

H H T - B e t o n v e r s u c h e

(Versuchsergebnisse - Vorprogramm)

Bericht erstattet von

Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. U. Schneider

Dipl.-Phys. U. Diederichs

August 1979

BIBLIOTHEK  
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
der Technischen Universität Braunschweig  
Postfach 1053  
3300 Braunschweig

Die Untersuchung wurde im Auftrage der Hochtemperatur-Reaktorbau-Gesellschaft mbH., Mannheim, durchgeführt (Az.: 642.122.0002. 94890.30).

## Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung . . . . .	2
2. Prüfung des Zements . . . . .	3
3. Prüfung der Zuschlagstoffe . . . . .	6
4. Probemischungen und ausgewählte Betonmischungen . . . . .	21
5. Druckfestigkeit und Rohdichte bei Normaltemperatur (20 °C) . .	39
6. Kalte Restdruckfestigkeit und Rohdichte von unversiegelten Probekörpern nach Dauertemperatur von 250 °C . . . . .	42
7. Kalte Restdruckfestigkeit und Rohdichte von unversiegelten Probekörpern nach 5 Temperaturzyklen (20 - 200 - 20 °C) . . .	45
8. Kalte Restdruckfestigkeit und Rohdichte von unversiegelten Probekörpern nach 10 Temperaturzyklen (20 - 70 - 20 °C) . . .	47
9. Kalte Restdruckfestigkeit und Rohdichte von versiegelten Probekörpern nach 10 Temperaturzyklen (20 - 70 - 20 °C) . . .	48
10. Statischer E-Modul bei Normaltemperatur (20 °C) . . . . .	49
11. Statischer E-Modul von unversiegelten Probekörpern bei Versuchshöchsttemperatur (250 °C) . . . . .	51
12. Statischer E-Modul von unversiegelten Probekörpern nach Temperaturbelastung im kalten Zustand (20 °C) . . . . .	53
13. Wärmedehnung an unversiegelten Probekörpern . . . . .	56
14. Zwängungsversuche . . . . .	69
15. Prüfung versiegelter Proben nach verschiedenen Temperatur- belastungen . . . . .	83
16. Zusammenfassung . . . . .	92
Anhang . . . . .	95
I Zwängungsversuche an Probekörpern der Universität Karlsruhe .	96
II Zwängungsversuche an Probekörpern aus Seibersdorf . . . . .	107
III Versuchsergebnisse von Probekörpern aus Lausanne . . . . .	118

## 1. Einleitung

Die im folgenden beschriebenen Untersuchungen dienten der Entwicklung eines hochfesten Normalbetons mit günstigen thermischen Eigenschaften. Der Beton soll im Zuge einer speziellen Reaktorentwicklung als Grundbaustoff zur Anwendung kommen. Insbesondere soll der Beton u. a. folgende Voraussetzungen erfüllen:

- Festigkeit nach 90 Tagen  $> 51 \text{ N/mm}^2$  nach einem oder mehreren Temperaturzyklen bis  $250^\circ\text{C}$ .
- Verarbeitbarkeit und Pumpbarkeit als Massenbeton in Bauteilen von mehreren Metern Dicke.
- Niedrige Wärmedehnung und geringe Wärmeentwicklung beim Betonieren.
- Hoher Elastizitätsmodul bei  $20^\circ\text{C}$  und niedriger E-Modul nach der Temperatureinwirkung.

Aus den o. g. Forderungen ergeben sich in betontechnologischer Hinsicht teilweise gegenläufige Anforderungen an die Betonmischung. Ausgehend von der vorgegebenen Zementart (HOZ 450 L), wurden deshalb in Abständen von wenigen Tagen insgesamt 12 Betonmischungen hergestellt und optimiert. Anhand dieser Mischungen wurden die im Rahmen dieses Programms untersuchten Betonmischungen A und B ausgewählt, wobei aus Zeitgründen im wesentlichen nur die Frischbetondaten und die 7-Tage-Festigkeiten zur Verfügung standen.

Im folgenden wird über sämtliche Untersuchungen, die im Rahmen des Vorprogramms durchgeführt wurden, berichtet. Zunächst werden die Ergebnisse der betontechnologischen Untersuchungen am Zement und Zuschlag mitgeteilt. Daran anschließend werden die 12 Probemischungen zusammenfassend diskutiert. Die gewählten Betonmischungen werden angegeben.

Die Ergebnisse aus den einzelnen Betonprüfungen der gewählten Betone A und B sind in den Abschnitten 5 bis 15 angegeben und kommentiert. In Abschnitt 16 sind die Ergebnisse zusammenfassend diskutiert und gewertet.

Im Anhang dieses Berichts sind Untersuchungs- und Meßergebnisse angegeben, die für andere Institute, die an diesem Vorprogramm mit eigenen Betonarten beteiligt

waren, durchgeführt wurden. Dabei handelt es sich um Zwängungsuntersuchungen an Betonproben aus Karlsruhe und Seibersdorf sowie um Festigkeits- und Ausdehnungsversuche an Proben aus Lausanne. Die Betonmischungen der Proben sind uns im einzelnen nicht bekannt und deshalb nicht gesondert aufgeführt.

## 2. Prüfung des Zements

Bei dem verwendeten Zement HOZ 450 L handelt es sich um Material der Wülfrather Zementwerke GmbH., Wülfrath bei Düsseldorf. Er wurde in Plastiksäcken verschweißt angeliefert und bis zu seiner Verarbeitung im Institut trocken gelagert.

Die Mahlfeinheit des Zements wurde durch Bestimmung des Rückstands auf dem Prüfsieb 0,2 nach DIN 4188 durchgeführt. Der Rückstand betrug im Mittel 0,1 Gew.-% und liegt damit deutlich unter der normseitig geforderten Menge von 3 Gew.-%. Die spezifische Oberfläche wurde nicht gemessen.

Die Raumbeständigkeit wurde durch den Kochversuch (DIN 1164 Blatt 6) nachgewiesen.

Das Erstarren wurde gemäß DIN 1164 Blatt 5 mittels Nadelgerät geprüft. Der Erstarrungsbeginn lag im Mittel bei 2 h 45 min und das Erstarrungsende bei 3 h 54 min und damit innerhalb der normseitig geforderten Werte (frühester Erstarrungsbeginn 1 h, spätestes Erstarrungsende 12 h).

Die Festigkeitsentwicklung des Zements wurde gemäß DIN 1164 Blatt 7 vorgenommen. Die Ergebnisse sind in der nachstehenden Tafel 1 (s. Seite 4) zusammengestellt. Außerdem ist der Festigkeitsverlauf auf dem nachfolgenden Bild 1 graphisch über die Zeit bis zum Alter von 90 Tagen aufgetragen. In jedem Einzelfall wurden die normseitig geforderten Werte eingehalten.

Dr. Schneider  
Dr. Weiß  

Bearbeitungs.-Nr. : 58/3960  
Entnahme :  
Probeneingang/Liefer.: 29. 08. 78  
Prüfer : H. W. H.

Erstarren, geprüft am 07. 09. 78

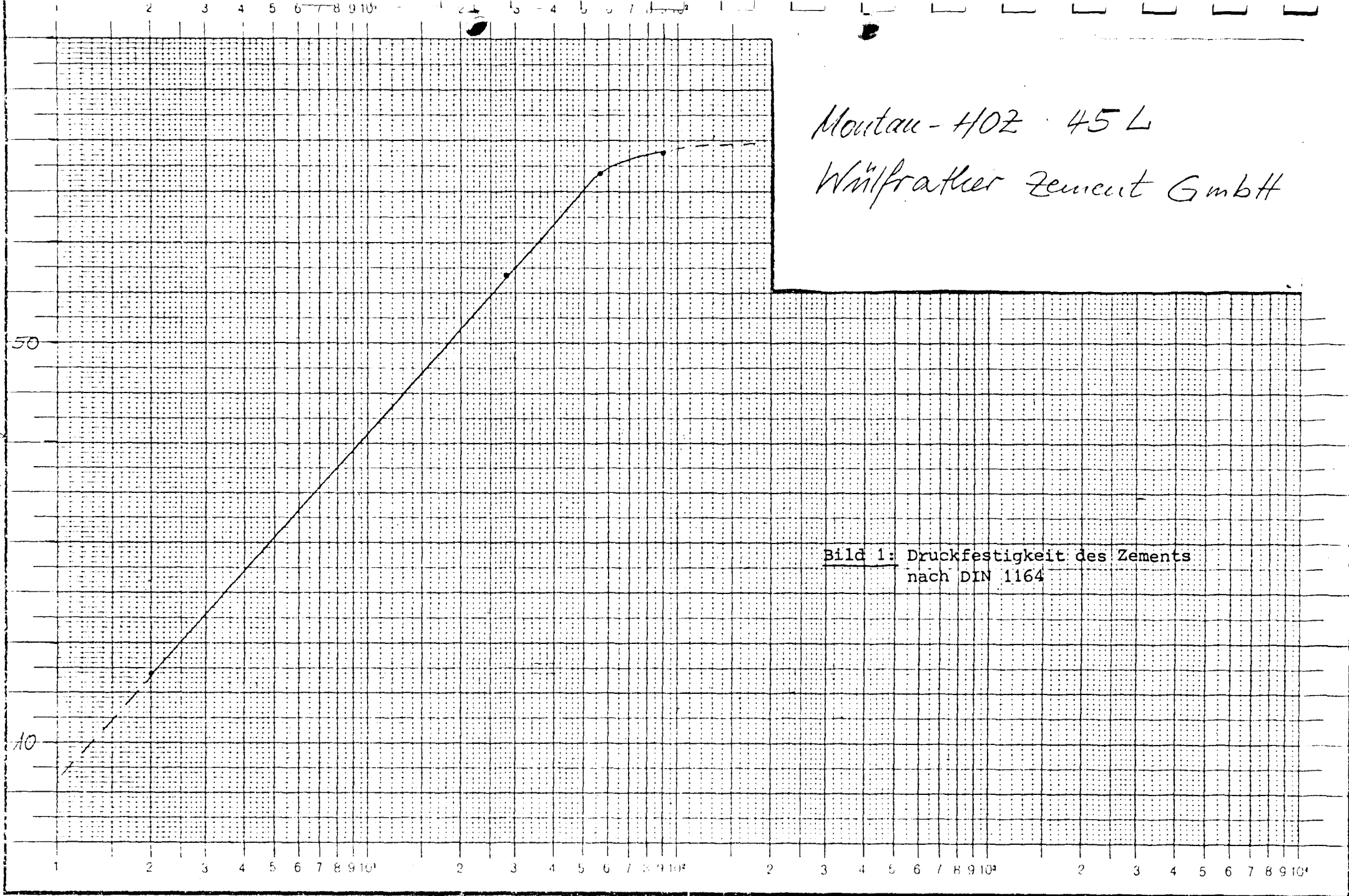
Festigkeitsprismen, Datum, Uhrzeit

Sieb 1.0	Normensteife		Erstarrungsbeginn		Erstarrungsende		Wasser g	hergestellt	entformt	Wasserlagerung	Prüf-tag	
	Wasser g	Wasser Gew.-%	einzeln	Mittel	einzeln	Mittel						
kein	140,7	<u>28,1</u>	2 h 44	<u>2 h 45</u>	3 h 53	<u>3 h 54</u>	225	06.09.78 1415	02.09.78 1259	07.09.78 08.09.78	08.09.78 1415	
Rückstand			2 h 46		3 h 56			06.09.78 1430	07.09.78 1205	07.09.78 1410	04.10.78	
Mahlfeinheit Sieb 0.2			Raumbeständigkeit - Kochversuch					12.09.78 1529	13.09.78 1315	13.09.78 1315	07.11.78	
g	Gew.-%	Mittel-%	Wasser	hergestellt	Datum Uhrzeit	Ergebnis		12.09.78 1535	13.09.78 1339	13.09.78 1414	11.12.78	
0,01	0,01	0,01	140,7 g	920	07.09.78 920	bestanden						
0,01	0,01		28,1 %		08.09.78 615 1135							

Prüf- alter Tage	Nr.	Abmessungen cm			Gewicht g	Raum- gewicht g/dm <sup>3</sup>	Biegezug- festigkeit		Druckfestigkeit				
		Länge	Breite	Höhe			kg	kg/cm <sup>2</sup>	KN	KN	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
08.09.78	1	15,98	4,07	4,00	584,0	2245	197	45,4	42,3	42,0	16,92	16,80	16,86
	2	15,99	4,07	4,00	584,2	2244	175	40,3	41,6	42,8	16,64	17,12	16,88
	3	15,99	4,07	4,00	583,1	2240	184	42,4	41,6	41,7	16,64	16,63	16,66
	Mittel					2243		42,7	44,19	N/mm <sup>2</sup>			16,80
04.10.78	1	16,00	4,08	4,00	589,5	2258	332	98,0	146,9	141,5	59,72	56,60	57,66
	2	16,00	4,07	4,00	590,2	2266	340	94,8	142,5	138,7	57,00	55,48	56,24
	3	16,00	4,06	4,00	589,2	2268	420	94,0	143,0	134,5	57,20	55,30	56,50
	Mittel					2264		94,1	142,97	N/mm <sup>2</sup>			56,80
02.11.78	1	15,96	4,06	4,00	585,0	2257	340	90,1	161,0	166,0	64,40	66,40	65,40
	2	15,96	4,07	4,00	586,3	2256	410	94,4	163,7	171,2	65,48	68,48	66,98
	3	15,96	4,07	4,00	589,3	2265	424	97,7	164,2	165,1	65,68	66,04	65,86
	Mittel					2259		94,1	162,23	N/mm <sup>2</sup>			66,08
11.12.78	1	16,01	4,09	4,00	592,5	2262	415	95,1	171,5	168,4	68,60	67,36	67,98
	2	16,01	4,10	4,00	594,7	2265	400	91,5	169,7	166,8	67,38	66,72	67,30
	3	16,01	4,10	4,00	594,5	2264	395	90,3	171,8	172,9	68,72	69,16	68,94
	Mittel					2264		92,3	170,5	N/mm <sup>2</sup>			68,07
	1												
	2												
	3												
	Mittel												
	1												
	2												
	3												
	Mittel												

Bemerkungen:

W/mt 20  
Zementdruckfestigkeit in



Prüfalter in Tagen

### 3. Prüfung der Zuschlagstoffe

Für die fünf Korngruppen 2/4 Quarzsand, 4/8 Quarzsand, 8/11 Basaltsplitt, 11/16 Basaltsplitt, 16/22 Basaltsplitt wurden Siebversuche durchgeführt und die entsprechenden Siebdurchgänge bzw. Siebrückstände auf Prüfsieben gemäß DIN 4226 ermittelt. Die Korngruppen 2/4 und 4/8 wiesen einen geringeren Unterkorn- bzw. Überkornanteil auf als von der Norm gefordert wird (normseitig zulässig: Korngruppe 2/4 - Unterkorngehalt 15 %, Überkorngehalt 10 %; alle übrigen Korngruppen - Unterkorngehalt 10 %, Überkorngehalt 10 %). Die Sieblinien der Basaltsplittkorngruppe wurden ebenfalls mit dem Prüfsiebsatz (0,25; 0,5; 1; 2; 4; 8; 16; 31,5; 63 mm Lochweite) ermittelt, so daß bei der Korngruppe 8/11 nun nur der Unterkornanteil ermittelt werden konnte. Er lag mit 7,9 % im zulässigen Bereich. Der Durchgang durch das 16 mm-Sieb betrug 100 %. Ähnliche Verhältnisse ergaben sich bei der Korngruppe 11/16 mm. Hier konnte nur der Überkorngehalt (7,3 %) bestimmt werden. Lediglich die Korngruppe 16/22 mm Basaltsplitt hatte einen zu hohen Unterkornanteil (ca. 25 % im Bereich 8 - 16 mm). Der dazugehörige Überkornanteil konnte dagegen nicht bestimmt werden. Eine zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse ist aus den nachfolgenden Tafeln 2 bis 6 auf den Seiten 8 bis 12 zu ersehen.

Den daran anschließenden Tafeln 7 bis 9 auf den Seiten 13 bis 15 sind die entsprechenden Werte der Kornrohichte, ermittelt nach DIN 4226, Ausgabe 1971, Blatt 3, und die Feuchtigkeitsgehalte zu entnehmen. Beim Studium der Einzelwerte fällt auf, daß die Streuung der Meßwerte äußerst gering ist, was auf eine gute, gleichmäßige Qualität der Zuschläge schließen läßt. Die Kornrohichte betrug für den Quarzsand  $2,60 \text{ kg/dm}^3$  und für den Basaltsplitt  $3,00 \text{ kg/dm}^3$ .

Die vergleichsweise hohe Rohdichte des Basaltsplitts ist in diesem Zusammenhang als vorteilhaft anzusehen.

Die Kornform der Korngruppen  $> 8 \text{ mm}$  wurden nach DIN 4226 und DIN 52 114 beurteilt. Die Ergebnisse sind in der nachfolgenden Tafel 10 auf Seite 16 dargestellt. Der Anteil der ungünstig ( $L : D > 3 : 1$ ) geformten Körner soll i.a. die Hälfte des Zuschlags über 8 mm nicht überschreiten; sie liegt hier bei der Korngruppe 8/11 mm unter 1/4 und erniedrigt sich noch mit größer werdenden Körnern, so daß der verwendete Basaltsplitt hinsichtlich der Kornform als günstig anzusehen ist.

Die Prüfung des Gehalts an Huminen erfolgte mit Natronlauge gemäß DIN 4226, Blatt 3. Beim Sand 0/2 mm und Quarzkies 4/8 wurden keine wesentlichen Mengen organischer Bestandteile festgestellt, während sich beim Quarzsand 2/4 vereinzelte Körner mit braunkohleartigem Habitus lösten. Insgesamt sind jedoch keine wesentlichen organischen Anteile beobachtet worden (s. Tafel 11, Seite 17).

Die abschlämbbaren Bestandteile wurden gemäß DIN 4226 Blatt 3 mit Hilfe des Auswaschversuchs bestimmt. Aus den nachfolgenden Tafeln 12 bis 14 (s. Seite 18 bis 20) ist zu entnehmen, daß die abschlämbbaren Bestandteile der Quarzsande (2/4 und 4/8 mm) vergleichsweise gering sind (2/4 mm = 0,25 Gew.-%, 4/8 mm = 0,28 Gew.-%). Der Basaltsplitt hatte je nach Korngruppe abschlämbbare Bestandteile zwischen 0,76 Gew.-% (Korngruppe 8/11 mm), 0,89 Gew.-% (Korngruppe 16/22) und 1,30 Gew.-% (Korngruppe 11/16 mm). Beim Sand 0/2 mm lagen die abschlämbbaren Bestandteile bei 1,13 Gew.-%.

Das bedeutet, daß die Quarzsande der Korngruppe 0/2, 2/4 und 4/8 hinsichtlich der abschlämbbaren Bestandteile unbedenklich verwendet werden können, da erst bei Gehalten an abschlämbbaren Bestandteilen oberhalb von 4 % für die Korngruppe 0/2 mm, 3 % für die Korngruppe 2/4 mm bzw. 2 % für die Korngruppe 4/8 mm, eine Beeinträchtigung der Betoneigenschaften durch die Feinstbestandteile der Zuschläge zu erwarten ist. Lediglich der Basalt liegt hinsichtlich der abschlämbbaren Bestandteile relativ hoch. Als Richtwerte werden hier 0,5 Gew.-% angegeben. Jedoch dürfte der mit maximal 0,7 Gew.-% festgestellte Anteil von abschlämbbaren Bestandteilen, aufgrund der Tatsache, daß es sich hierbei um feinverteiltes Gesteinsmehl handelt, vermutlich einen eher günstigen Einfluß auf die Verarbeitung und Festigkeitsentwicklung des Betons haben.



Antragsteller:

Dr. Schneider, Dr. Weiß

Tafel 2

- 8 -

Korngruppe : 2/4

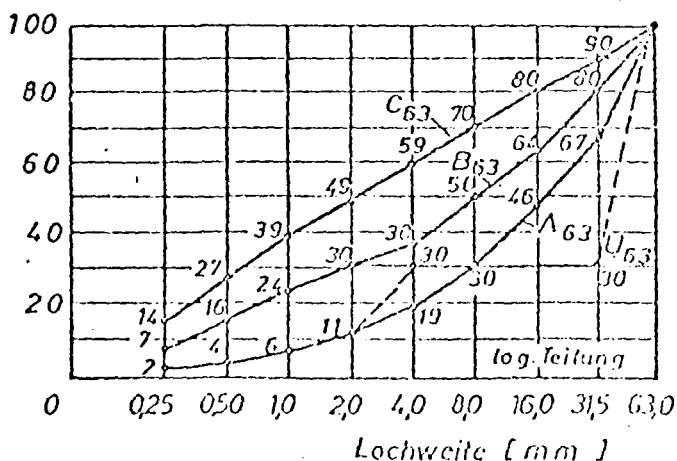
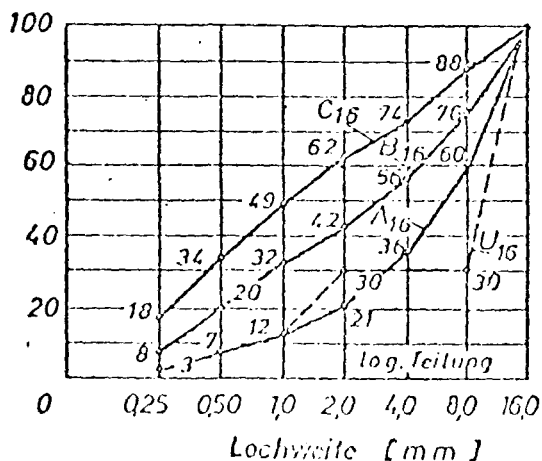
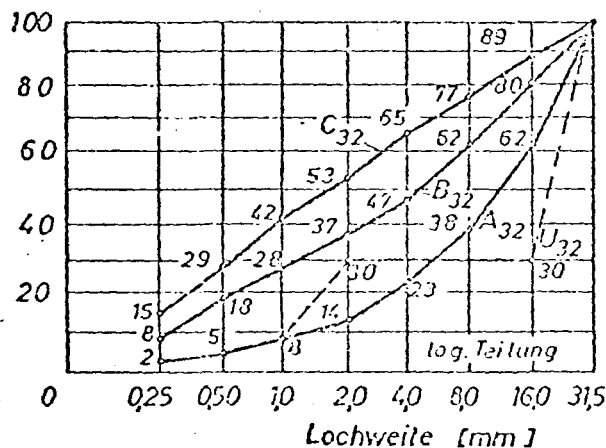
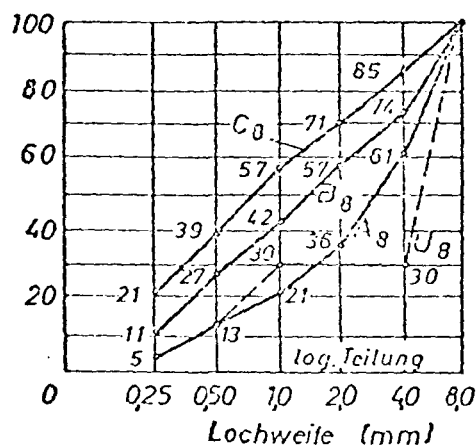
Entnahme : \_\_\_\_\_

Eingang : 19.09.78Prüfung am: 20.09.78Prüfer : Trom / PanhaleaBearb.-Nr. : 58/3960

Tafel:

DIN 4226

Korn- gruppe mm	Anteile in g und Gewichts-%										
	Versuch 1			Versuch 2			Versuch 3			Mittelwerte	
	Rückstand g	Durchg. %	Durchg. %	Rückstand g	Durchg. %	Durchg. %	Rückstand g	Durchg. %	Durchg. %	Rückstand %	Durchgang %
0-0,25	2	0,1	0,1	2	0,1	0,1	4	0,2	0,2	0,1	0,1
0,25-0,5	2	0,1	0,2	2	0,1	0,1	4	0,2	0,4	0,1	0,2
0,5 - 1	6	0,3	0,5	6	0,3	0,5	6	0,3	0,7	0,3	0,5
1 - 2	108	5,4	5,9	98	4,9	5,4	96	4,8	5,5	5,1	5,6
2 - 4	1712	85,6	91,5	1714	85,7	91,1	1702	85,1	90,6	85,5	91,1
4 - 8	170	8,5	100,0	178	8,9	100,0	188	9,4	100,0	8,9	100,0
8 - 16	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
16,0 - 31,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
31,5 - 63,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Summe	2000	100,0	—	2000	100,0	—	2000	100,0	—	100,0	—

Schaubild:  
DIN 1045

Antragsteller:  
Dr. Schneider, Dr. Weiß

T a f e l 3

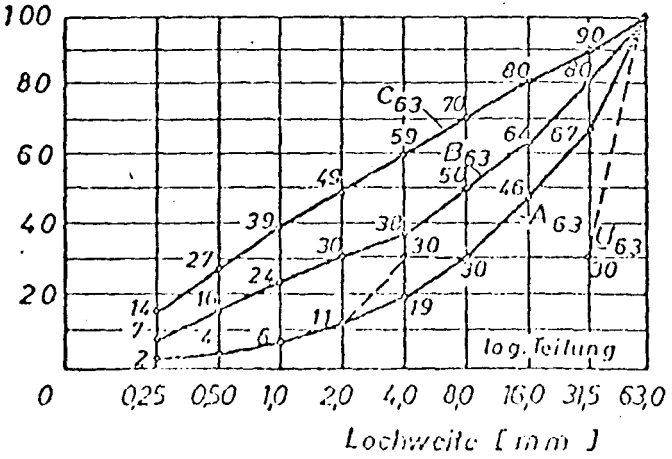
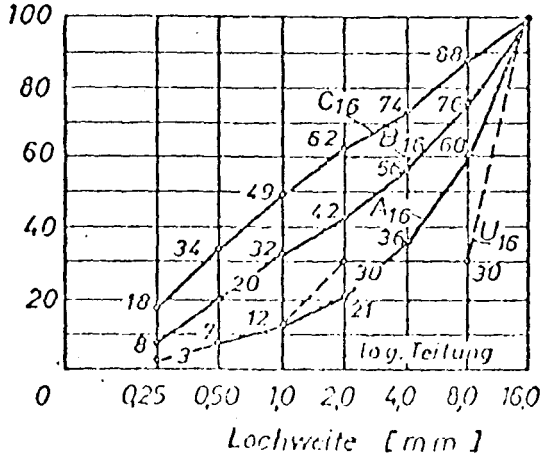
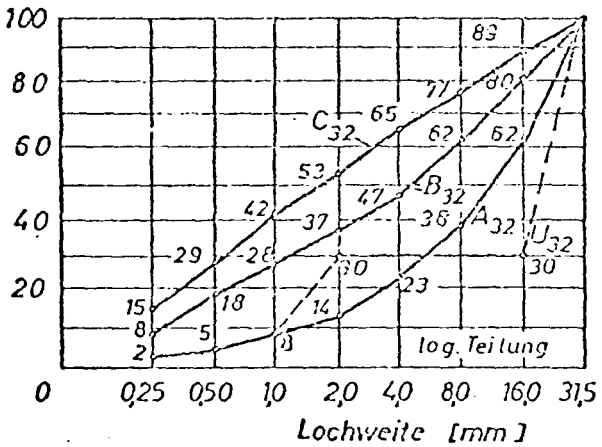
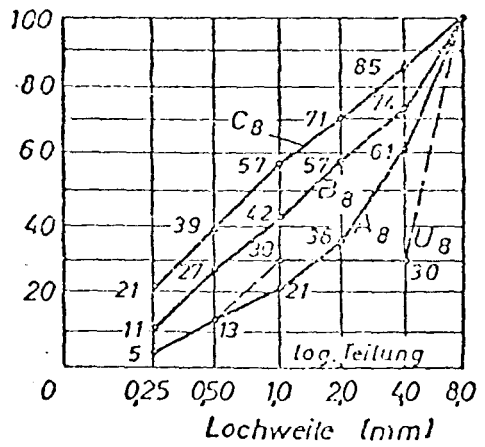
Korngruppe : 4/8  
Entnahme : \_\_\_\_\_  
Eingang : 19.09.78

Prüfung am: 20.04.78  
Prüfer : Froese / Panhalla  
Bearb.-Nr. : 58/3960

Tafel: DIN 4226

Korn- gruppe mm	Anteile in g und Gewichts - %.										
	Versuch 1			Versuch 2			Versuch 3			Mittelwerte	
	Rückstand g	Durchg. %	Durchg. %	Rückstand g	Durchg. %	Durchg. %	Rückstand g	Durchg. %	Durchg. %	Rückstand %	Durchgang %
0-0,25	2	0,1	0,1	2	0,1	0,1	2	0,1	0,1	0,1	0,1
0,25-0,5	—	—	0,1	—	—	0,1	—	—	0,1	—	0,1
0,5 - 1	—	—	0,1	—	—	0,1	—	—	0,1	—	0,1
1 - 2	4	0,2	0,3	8	0,4	0,5	6	0,3	0,4	0,3	0,4
2 - 4	74	3,7	4,0	92	4,6	5,1	74	3,7	4,1	4,0	4,4
4 - 8	1814	90,7	94,7	1804	90,2	95,3	1804	90,2	94,3	90,4	94,8
8 - 16	106	5,3	100,0	94	4,7	100,0	114	5,7	100,0	5,2	100,0
16,0 - 31,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
31,5 - 63,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Summe	2000	100,0	—	2000	100,0	—	2000	100,0	—	100,0	—

Schaubild:  
DIN 1045



Antragsteller: Dr. Schneider, Dr. Weiß

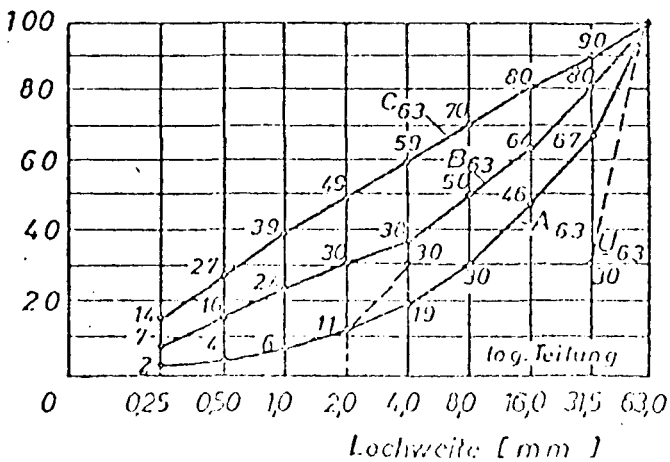
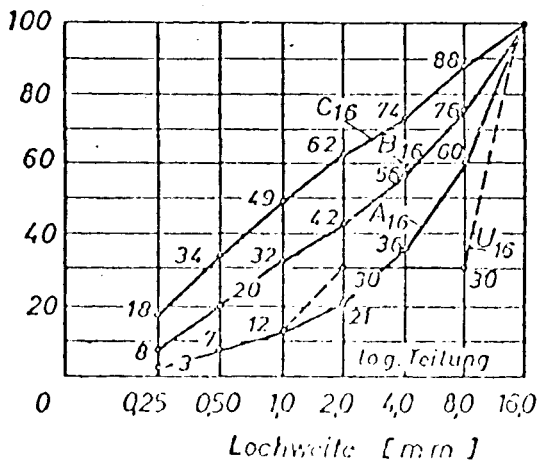
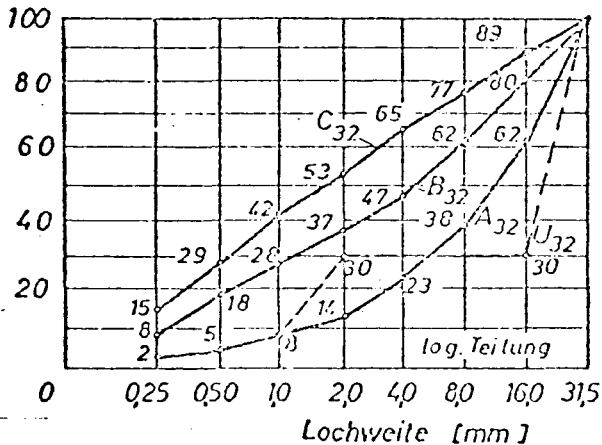
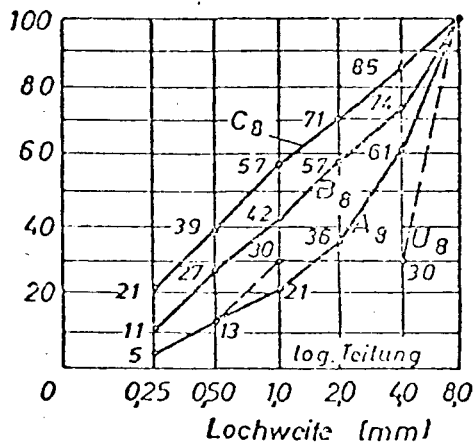
Korngruppe : 8 / 11  
 Entnahme : \_\_\_\_\_  
 Eingang : 19. 09. 78

Prüfung am: 20. 09. 78  
 Prüfer : Froen / Panhalla  
 Bearb.-Nr. : 58 / 3960

Tafel: DIN 4226

Korn- gruppe mm	Anteile in g und Gewichts - %										
	Versuch 1			Versuch 2			Versuch 3			Mittelwerte	
	Rückstand g	Durchg. %	Durchg. %	Rückstand g	Durchg. %	Durchg. %	Rückstand g	Durchg. %	Durchg. %	Rückstand %	Durchgang %
0-0,25	2	0,1	0,1	1	—	—	1	—	—	—	—
0,25-0,5	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,5 - 1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1 - 2	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2 - 4	5	0,1	0,2	1	—	—	3	0,1	0,1	0,1	0,1
4 - 8	265	7,6	7,8	272	7,8	7,8	284	8,1	8,2	7,8	7,9
8 - 16	3226	92,2	100,0	3226	92,2	100,0	3212	91,8	100,0	92,1	100,0
16,0 - 31,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
31,5 - 63,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Summe	3500	100,0	—	3500	100,0	—	3500	100,0	—	100,0	—

Schaubild:  
 DIN 1045



Antragsteller:

Dr. Schneider, Dr. Weiß

- 11 -

## Tafel 5

Korngruppe : 11 / 16  
 Entnahme :                       
 Eingang : 19.09.78

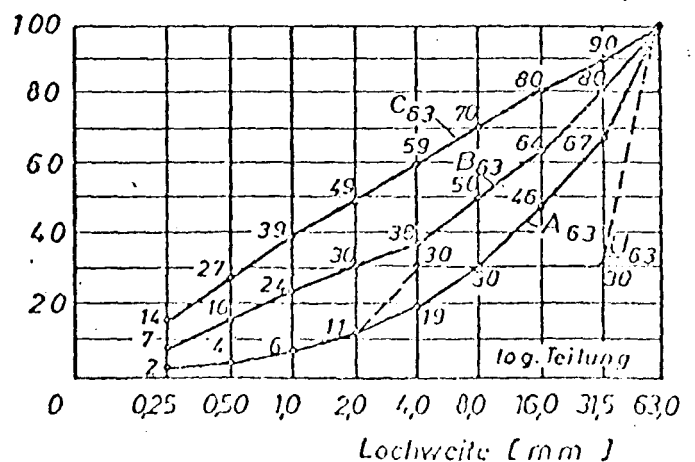
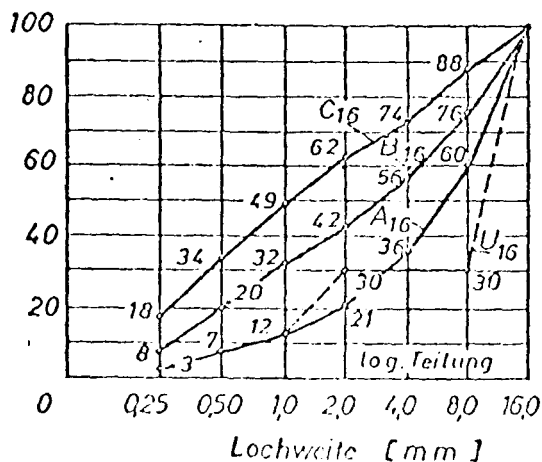
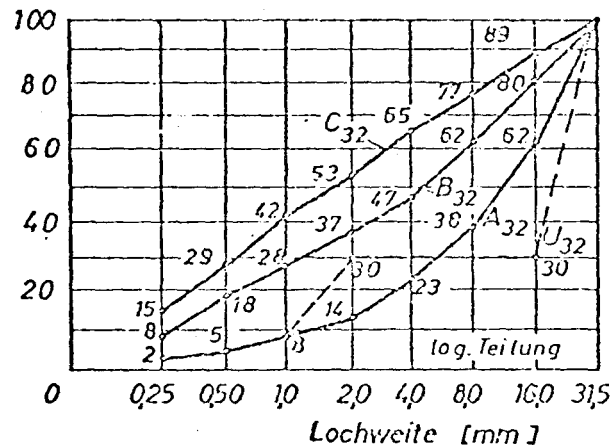
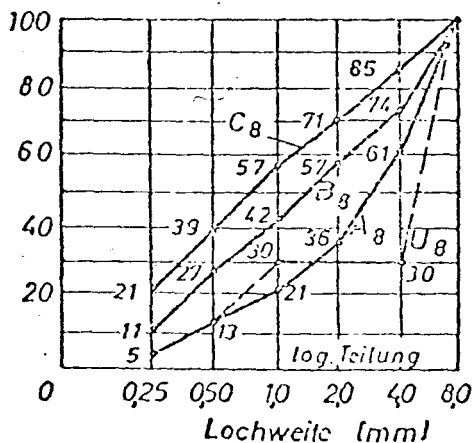
Prüfung am: 20.09.78  
 Prüfer : Fren/Pankalla  
 Bearb.-Nr. : 58 / 3960

Tafel:

DIN 4226

Korn- gruppe mm	Anteile in g und Gewichts-%										
	Versuch 1			Versuch 2			Versuch 3			Mittelwerte	
	Rückstand g	Durchg. %	Durchg. %	Rückstand g	Durchg. %	Durchg. %	Rückstand g	Durchg. %	Durchg. %	Rückstand %	Durchgang %
0-0,25	9	0,3	0,3	6	0,2	0,2	7	0,2	0,2	0,2	0,2
0,25-0,5	1	—	0,3	—	—	0,2	—	—	0,2	—	0,2
0,5-1	1	—	0,3	—	—	0,2	—	—	0,2	—	0,2
1-2	2	0,1	0,4	1	—	0,2	1	—	0,2	—	0,2
2-4	8	0,2	0,6	7	0,2	0,4	9	0,3	0,5	0,2	0,4
4-8	154	4,4	5,0	161	4,6	5,0	166	4,7	5,2	4,6	5,0
8-16	3081	88,0	93,0	3075	87,4	92,4	3047	87,1	92,3	87,7	92,7
16,0-31,5	244	7,0	100,0	250	7,1	100,0	270	7,7	100,0	7,3	100,0
31,5-63,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Summe	3500	100,0	—	3500	100,0	—	3500	100,0	—	100,0	—

Schaubild:  
 DIN 1045



Antragsteller:

Dr. Schneider, Dr. Weiß

- 12 -

Tafel 6

Korngruppe : 16/22

Entnahme :

Eingang : 19.09.78

Prüfung am: 21.09.78

Prüfer : Fwre/Pan.halla

Bearb.-Nr. : 58/3960

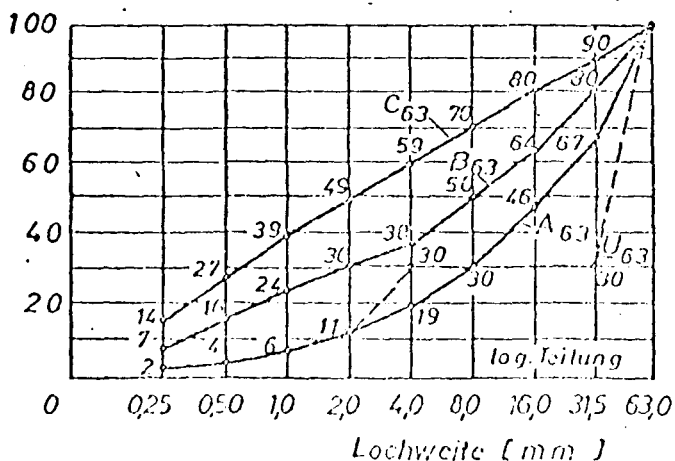
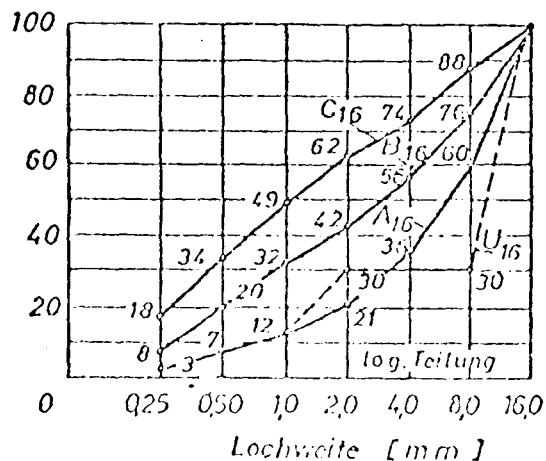
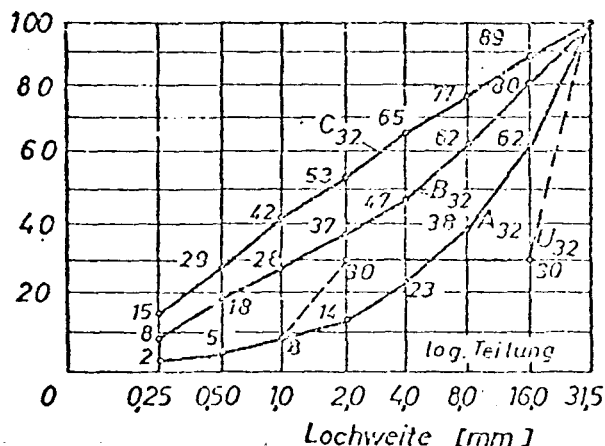
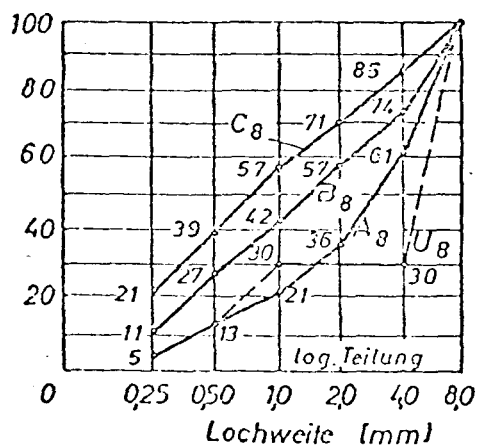
Tafel:

DIN 4226

Korn- gruppe mm	Anteile in g und Gewichts - %										
	Versuch 1			Versuch 2			Versuch 3			Mittelwerte	
	Rückstand g	Durchg. %		Rückstand g	Durchg. %		Rückstand g	Durchg. %		Rückstand %	Durchgang %
0-0,25	1	—	—	3	0,1	0,1	9	0,2	0,2	0,1	0,1
0,25-0,5	—	—	—	—	—	—	3	0,1	0,3	—	0,1
0,5 - 1	—	—	—	—	—	—	2	—	0,3	—	0,1
1 - 2	—	—	—	—	—	—	5	0,1	0,4	—	0,1
2 - 4	2	—	—	1	—	—	14	0,3	0,7	0,1	0,2
4 - 8	58	1,2	1,2	65	1,3	1,4	91	1,8	2,5	1,5	1,7
8 - 16	1258	25,2	26,4	1294	25,9	27,3	1256	25,1	27,6	25,4	27,1
16,0-31,5	3681	73,6	100,0	3637	72,7	100,0	3620	72,4	100,0	72,9	100,0
31,5 - 63,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Summe	5000	100,0	—	5000	100,0	—	5000	100,0	—	100,0	—

Schaubild:

DIN 1045



Antragsteller :

Dr. Schneider, Dr. Weiß

Bearb.-Nr. : 58/3960

Entnahme :

Eingang : 19. 09. 78

Geprüft : 22. 09. 78

Prüfer : Hone

Kornrohddichte : Nach DIN 4226 Ausgabe 1971 Blatt 3 Abs. 3.4.2.

Korngruppe : Quarz 2/4 (Feuchtigkeitsgehalt 3,15 Gew.-%)

Versuch-Nr.	1	2	3	Mittel
Gew.-Probe tr. in g	1000	1000	1000	
Wasser im Meßzylinder in ml	500	500	500	
Wasser u. Probe im Meßzylinder in ml	884	885	885	
Volumen der Probe in cm <sup>3</sup>	384	385	385	
Rohddichte in Kg/dm <sup>3</sup>	2,60	2,60	2,60	2,60
Petroleummenge in g	—	—	—	

Korngruppe : Quarz 4/8 (Feuchtigkeitsgehalt 1,93 Gew.-%)

Versuch-Nr.	1	2	3	Mittel
Gew.-Probe tr. in g	1000	1000	1000	
Wasser im Meßzylinder in ml	500	500	500	
Wasser u. Probe im Meßzylinder in ml	884	885	884	
Volumen der Probe in cm <sup>3</sup>	384	385	384	
Rohddichte in Kg/dm <sup>3</sup>	2,60	2,60	2,60	2,60
Petroleummenge in g	—	—	—	

Bemerkung : Durchschnittsprobe aus 3 Säcken je Korngruppe

Antragsteller :

Dr. Schneider, Dr. Weiß

Bearb.-Nr. : 58 / 3960Entnahme :Eingang : 19. 09. 78Geprüft : 22. 09. 78Prüfer : TwerKornrohdichte : Nach DIN 4226 Ausgabe 1971 Blatt 3 Abs. 3.4.<sup>1</sup>Korngruppe : Basalt 8/11 (Feuchtigkeitsgehalt 0,48 Gew.-%)

Versuch-Nr.	1	2	3	Mittel
Gew.-Probe tr. in g	1000	1000	1000	
Wasser im Meßzylinder in ml	500	500	500	
Wasser u. Probe im Meßzylinder in ml	833	832	834	
Volumen der Probe in cm <sup>3</sup>	333	332	334	
Rohdichte in Kg/dm <sup>3</sup>	3,00	3,01	2,99	3,00
Petroleummenge in g	—	—	—	

Korngruppe : Basalt 11/16 (Feuchtigkeitsgehalt 0,48 Gew.-%)

Versuch-Nr.	1	2	3	Mittel
Gew.-Probe tr. in g	1000	1000	1000	
Wasser im Meßzylinder in ml	500	500	500	
Wasser u. Probe im Meßzylinder in ml	831	834	833	
Volumen der Probe in cm <sup>3</sup>	331	334	333	
Rohdichte in Kg/dm <sup>3</sup>	3,02	2,99	3,00	3,00
Petroleummenge in g	—	—	—	

Bemerkung : Durchschnittsprobe aus 3 Säcken je Korngruppe

Antragsteller :Dr. Schneider, Dr. WeißBearb.-Nr. : 58/3960Entnahme :Eingang : 19. 09. 78Geprüft : 25. 09. 78Prüfer : HoerKornrohddichte : Nach DIN 4226 Ausgabe 1971 Blatt 3 Abs. 3.4.<sup>1.</sup>Korngruppe : Basalt 16/22 (Feuchtigkeitsgehalt 0,41 Gew.-%)

Versuch-Nr.	1	2	3	Mittel
Gew.-Probe tr. in g	1000	1000	1000	
Wasser im Meßzylinder in ml	500	500	500	
Wasser u. Probe im Meßzylinder in ml	835	831	833	
Volumen der Probe in cm <sup>3</sup>	335	331	333	
Rohddichte in Kg/dm <sup>3</sup>	2,99	3,02	3,00	3,00
Petroleummenge in g	—	—	—	

Korngruppe :

Versuch-Nr.	1	2	3	Mittel
Gew.-Probe tr. in g				
Wasser im Meßzylinder in ml	500	500	500	
Wasser u. Probe im Meßzylinder in ml				
Volumen der Probe in cm <sup>3</sup>				
Rohddichte in Kg/dm <sup>3</sup>				
Petroleummenge in g				

Bemerkung : Durchschnittsprobe aus 3 Säcken je Korngruppe



Dr. Schmeider

Dr. Weip

Bearb. - Nr.: 58/3960

Eingang : 19.09.78

Geprüft : 25.09.78

Prüfer : Töwe/Pankalla

T a f e l 10

Material: Basaltsplitt

Kornform > 8 mm nach DIN 4226 und DIN 52 114

Korngruppe mm	Einwaage		Ungünstig geformt ( $L:D > 3:1$ )		
	g	Anzahl der Körner	g	Anzahl der Körner	Gew.-%
8/11	395,9	300	94,6	93	23,89
11/16	889,6	300	154,7	74	17,39
16/22	1921,2	300	263,2	56	13,70

Herr Kanisch

58/ 3960

(Dr. Schneider, Dr. Weip)

1 Sand 0/2, 2 Quarzite

T a f e l 11

Stoffe organischen Ursprungs. - Prüfung mit Natriolauge - nach  
DIN 4226 Bl. 3 Abs. 3.6.2

Sand 0/2

hellgelbe Verfärbung der überstehenden Natriolauge nach 24 Std. -  
keine wesentlichen Mengen organ. Bestandteile vorhanden.

Quarz 2/4

hellgelbe Verfärbung - vereinzelte kleine Körner lösen sich  
(braunkohlastig)

Quarz 4/8

hellgelbe Verfärbung - keine wesentlichen Mengen organ. Bestandteile

Antragsteller:

- 18 -

Bearb.-Nr.: 58/3960

Dr. Schneider, Dr. Weip

Entnahme:

Eingang: 19.09.78

Geprüft: 19.09.-02.10.78

Prüfer: twen

Tafel 12

Auswaschversuch nach DIN 4226 Blatt 3 Abs. 3.6.1.2.

Korngruppe: Quarz 2/4

Durchschnittsprobe aus 3 Säcken

+) Trockengewicht:

Prb. Nr.	Einwaage-Ltr. g	Gew. - 1 g	Gew. - 2 g	Gewicht (tr.) in g	
				einzel	Mittel
1	5000,0		4846,2	4846,2	4847,2
2	5000,0		4848,2	4848,2	

Auswaschversuch:

5000,0 Ltr. = 4847,2 g tr.  
2000,0 Ltr. = X g tr.

$$X = \frac{4847,2 \cdot 2000,0}{5000,0} = 1938,9$$

Prb. Nr.	Einwaage (ltr.) g	Trockengew. g	Auswaage (tr.) g	Abschlammbares < 0,063 Gew. - %		
				g	einzel	Mittel
1	2000,0	1938,9	1933,8	5,1	0,26	0,25
2	2000,0	1938,9	1934,2	4,7	0,24	
3						

Bemerkung:

Feuchtigkeitsgehalt: 1) 153,8g = 3,17 Gew.-%

Korngruppe: Quarz 4/8

2) 151,8g = 3,13 Gew.-%

Durchschnittsprobe aus 3 Säcken

Mittel = 3,15 Gew.-%

+) Trockengewicht:

Prb. Nr.	Einwaage Ltr. g	Gew. - 1 g	Gew. - 2 g	Gewicht (tr.) in g	
				einzel	Mittel
1	5000,0		4904,3	4904,3	4905,4
2	5000,0		4906,5	4906,5	

Auswaschversuch:

5000,0 Ltr. = 4905,4 g tr.  
2000,0 Ltr. = X g tr.

$$X = \frac{4905,4 \cdot 2000,0}{5000,0} = 1962,2$$

Prb. Nr.	Einwaage (ltr.) g	Trockengew. g	Auswaage (tr.) g	Abschlammbares < 0,063 Gew. - %		
				g	einzel	Mittel
1	2000,0	1962,2	1956,0	6,2	0,32	0,28
2	2000,0	1962,2	1957,4	4,8	0,24	
3						

Bemerkung:

Feuchtigkeitsgehalt: 1) 95,7g = 1,95 Gew.-%

+) 5000 g - Einwaage war nötig, da das Prüfgut anschließend zur Bestimmung der Kornverhältnisse verwendet wurde.

2) 93,5g = 1,91 Gew.-%

Mittel = 1,93 Gew.-%

Antragsteller:

Dr. Schneider, Dr. Weipf

Bearb.-Nr.: 58/3960

Entnahme:

Eingang: 19.09.78

Geprüft: 19.09.-10.10.78

Prüfer: Frey

Tafel 13

Auswaschversuch nach DIN 4226 Blatt 3 Abs. 3.6.1.2.

Korngruppe: Basalt 8/11

Durchschnittsprobe aus 3 Säcken

Trockengewicht:

Prb. Nr.	Einwaage-Ur. g	Gew. - 1 g	Gew. - 2 g	Gewicht (tr.) in g	
				einzel	Mittel
1	5000,0		4976,5	4976,5	4976,3
2	5000,0		4976,1	4976,1	

Auswaschversuch:

Prb. Nr.	Einwaage (ltr.) g	Trockengew. g	Auswaage (tr.) g	Abschlammbares < 0,063 Gew. - %		
					einzel	Mittel
1	5000,0	4976,3	4940,2	36,1	0,73	0,76
2	5000,0	4976,3	4937,3	39,0	0,78	
3						

Bemerkung:

Feuchtigkeitsgehalt: 1) 23,5g = 0,47 Gew.-%

2) 23,9g = 0,48 Gew.-%

Mittel = 0,48 Gew.-%

Korngruppe: Basalt 11/16

Durchschnittsprobe aus 3 Säcken

Trockengewicht:

Prb. Nr.	Einwaage Ltr. g	Gew. - 1 g	Gew. - 2 g	Gewicht (tr.) in g	
				einzel	Mittel
1	5000,0		4974,9	4974,9	4976,0
2	5000,0		4977,0	4977,0	

Auswaschversuch:

Prb. Nr.	Einwaage (ltr.) g	Trockengew. g	Auswaage (tr.) g	Abschlammbares < 0,063 Gew. - %		
					einzel	Mittel
1	5000,0	4976,0	4913,3	62,7	1,26	1,30
2	5000,0	4976,0	4909,3	66,2	1,34	
3						

Bemerkung:

Feuchtigkeitsgehalt: 1) 25,1g = 0,50 Gew.-%

2) 23,0g = 0,46 Gew.-%

Mittel = 0,48 Gew.-%

Antragsteller:

- 20 -

Bearb.-Nr.: 58/3960

Dr. Schneider, Dr. Wolf

Entnahme:

Eingang: 19.09.78

Geprüft: 19.09.-19.10.78

Prüfer: frei

Tafel 14

Auswaschversuch nach DIN 4226 Blatt 3 Abs. 3.6.1.2.

Korngruppe: Basalt 16/22

Durchschnittsprobe aus 3 Säcken

Trockengewicht:

Prb. Nr.	Einwaage-Ur. g	Gew. - 1 g	Gew. - 2 g	Gewicht (tr.) in g	
				einzel	Mittel
1	5000,0		4979,7	4979,7	4979,8
2	5000,0		4979,9	4979,9	

Auswaschversuch:

Prb. Nr.	Einwaage (ltr.) g	Trockengew. g	Auswaage (tr.) g	Abschlammbares < 0,063 Gew. - %		
					einzel	Mittel
1	5000,0	4979,8	4934,3	45,5	0,91	0,89
2	5000,0	4979,8	4936,6	43,2	0,87	
3						

Bemerkung:

Feuchtigkeitsgehalt: 1) 20,3 g = 0,41 Gew.-%

Korngruppe: Sand 0/2

2) 20,1 g = 0,40 Gew.-%

Mittel = 0,41 Gew.-%

Durchschnittsprobe aus dem Silo

Trockengewicht:

Prb. Nr.	Einwaage ltr. g	Gew. - 1 g	Gew. - 2 g	Gewicht (tr.) in g	
				einzel	Mittel
1	1000,0		965,4	965,4	965,2
2	1000,0		964,9	964,9	

Auswaschversuch:

Prb. Nr.	Einwaage (ltr.) g	Trockengew. g	Auswaage (tr.) g	Abschlammbares < 0,063 Gew. - %		
					einzel	Mittel
1	1000,0	965,2	954,3	10,9	1,13	1,13
2	1000,0	965,2	954,3	10,9	1,13	
3						

Bemerkung:

#### 4. Probemischungen und ausgewählte Betonmischungen

Zur Festlegung der endgültigen Betonrezepturen wurden insgesamt 12 Probemischungen erstellt. Die entsprechenden Rohdichten, Druckfestigkeiten, Ausbreit- und Verdichtungsmaße sowie die Zusammensetzungen, Sieblinien und eine Beurteilung der Pumpbarkeit sind in der nachfolgenden Tabelle 1 auf Seite 22 zu finden. Die Sieblinien sind aus den separat angefügten Tafeln 15 bis 22 bzw. Graphen (s. Seiten 23 bis 30) zu ersehen.

Aus den 12 Mischungen wurden 2 für die späteren Versuche ausgewählt:

Probemischung 11  $\hat{=}$  Serie A

Probemischung 6 und 9 (kombiniert)  $\hat{=}$  Serie B

Der genaue Aufbau der beiden Betonmischungen ist auf den Betonierprotokollen (s. Tafel 23 bis 30, Seiten 31 bis 38) angegeben. In beiden Fällen wurden 60 kg EFA-Füller pro m<sup>3</sup> Beton zugegeben. Der Füller wurde auftragsgemäß nicht gesondert untersucht. Es handelt sich dabei um einen EFA-Füller der Firma H. Keller, Dortmund, der nach Herstellerangaben auch langfristig zur Verfügung steht.

Die Pumpbarkeit des Betons wurde nach Augenschein aufgrund langjähriger Baustellenerfahrung von Herrn Ranisch, Institut f. Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig beurteilt. Folgende vier Klassen wurden gewählt<sup>+)</sup> :

- a) - nicht pumpbar
- b) 0 u. U., dann aber schlecht pumpbar
- c) + pumpbar
- d) ++ im Vergleich zu allen vorliegenden Mischungen am besten pumpbar.  
Absolut gesehen - d. h. im Vergleich mit "normalen" Mischungen - an der unteren Grenze der "mäßig gut" pumpbaren Betonmischungen liegend.

Ferner wurde von Herrn Ranisch festgestellt, daß gegen die Pumpbarkeit u. U. wegen des zu erwartenden hohen Pumpenverschleißes Bedenken bestehen, während hinsichtlich der erreichbaren Fördermengen gute Leistungen zu erwarten sind. Eine abschließende objektive Beurteilung der Pumpbarkeit des Betons kann nur mit Hilfe eines Pumpversuchs unter Baustellenbedingungen erfolgen.

Im Hinblick auf die Durchführung der einzelnen Temperaturversuche und -prüfungen war es nicht möglich, alle Betonproben einer Serie gleichzeitig zu betonieren. Es wurden deshalb in Abständen von 4 Wochen für jede Serie die Proben 1 bis 52 und 53 - 101 gesondert betoniert. Daraus ergaben sich für die Serien A und B insgesamt 4 Betoniertermine (s. Protokolle auf S. 31 bis 38).

---

<sup>+)</sup>  Die Symbole -, 0, + und ++ sind auf der Tabelle 1 der Probemischungen (s. Seite 22) angegeben.

Tabelle 1: Zusammenstellung der Betondaten der 12 Probemischungen

Beton Nr.	Datum	Zement kg/cm <sup>3</sup>	Wasser- gehalt kg/cm <sup>3</sup>	W/Z- Wert w/b <sub>ges</sub>	EFA- Füller	Sand 0/2 Vol. %	Kies 2/8 Vol. %	Splitt 8/16 Vol. %	Splitt 16/22 Vol. %	Fließ- mittel % v. Z.G.	Verdichtungs- maß ohne SV	Ausbreit- maß mit SV	Pumpbar- keit	Rohdichte		Druckfestigkeit				
														frisch kg/dm <sup>3</sup>	fest kg/dm <sup>3</sup>	7 Tage B <sub>c150</sub> N/mm <sup>2</sup>	14 Tage B <sub>c150</sub> N/mm <sup>2</sup>	28 Tage B <sub>W</sub> N/mm <sup>2</sup>	56 Tage B <sub>W</sub> N/mm <sup>2</sup>	90 Tage B <sub>W</sub> N/mm <sup>2</sup>
1	26.9.73	400	152	0,38	50	20	25	20	35	2,5 A	1,37	36	0	2,51						
2	26.9.73	350	151,33	0,43	50	20	25	20	35	2,5 B	1,37	35	—	2,540						
3	26.9.73	350	145,33	0,41	100	16	20	18	48	1,5 W	1,39	40	—	2,55						
4	2.10.73	370	153,33	0,41	—	25	20	20	35	2	1,23	40	0	2,60						
5	2.10.73	370	171,33	0,43	60	25	20	20	35	2,5	1,40	32	—	2,56						
6	2.10.73	370	177,33	0,44	60	30	20	20	50	2	1,36	36	—	2,585						
7	3.10.73	370	159,33	0,43	30	25	20	20	35	2	1,4	37	0	2,55						
8	3.10.73	360	162,0	0,45	60	25	20	20	35	2	1,22	37	0	2,595						
9	3.10.73	360	162	0,45	60	35	—	25	40	2,5	1,31	40	+	2,640						
10	4.10.73	360	162	0,45	60	35	—	25	40	2	1,22	46	++	2,57						
11	4.10.73	360	148	0,41	60	30	22	18	30	2	1,29	39	++	2,52						
12	4.10.73	350	145	0,41	100	20	24	20	36	2-2,5	1,32	44	++	2,515						
		362	148	0,41/0,36	103									2,61	2,60	43,4	49,6 (10)	74,7	76,9	87,6

LET-201a

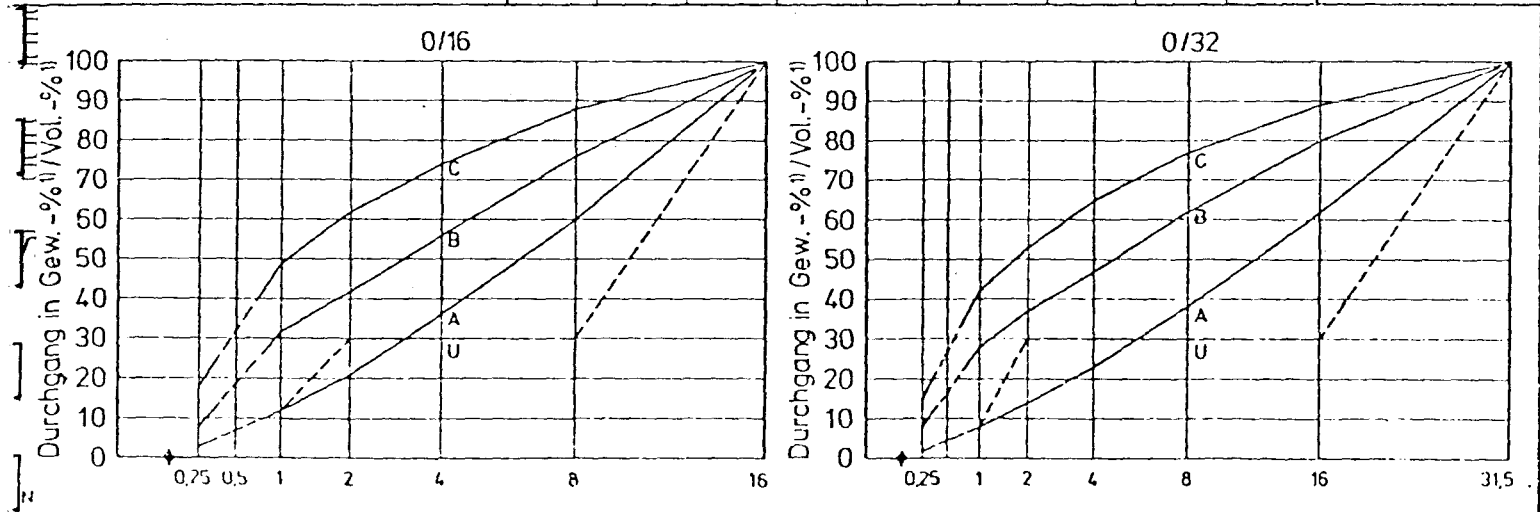
September 14. 7

Probe-Kenn- zeichen	Korn- gruppe mm	Zuschlagart	Durchgang in Gewichts-%"/Volumen-%" durch die Siebe									Bemerkungen
			0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5	63	
	0/2	Sand	5,8	35,9	70,4	90,3	99,5	100	100	100		Tafel 15
	2/4	Quarz	0,7	0,2	0,5	5,6	91,1	100	100	100		
	4/8	-"-	0,7	0,1	0,1	0,4	4,4	94,8	100	100		
	8/11	Bosall	0,1	0,1	0,1	0,1	0,7	7,9	100	100		
	11/16	"	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4	5,0	92,7	100		
	16/22	"	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	1,7	27,1	100		

## Fieblinien

Probe-Kenn- zeichen	Korn- gruppe mm	Anteil %	Durchgang in Gewichts- % <sup>1)</sup> /Volumen- % <sup>1)</sup> durch die Siebe								Sieblinie Nr. 7
			0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5	
	0/2	20	1,2	7,2	14,1	18,1	19,9	20	20	20	
	2/4	12	—	—	0,1	0,7	10,9	12	12	12	
	4/8	13	—	—	—	0,1	9,6	12,3	13	13	
	0/17	15	—	—	—	—	—	1,2	15	15	
	17/16	15	—	—	—	—	—	0,8	14	15	
Summe	16/22	25 <sup>100</sup>	0,1	0,2	0,1	0,2	9,4	0,3	7	25	
Summe			1,3	7,4	14,2	19,1	31,8	46,6	81	100	

Sollsieblinie Nr. 1

[illegible]

1) Die hochgestellten Strichen

(Ort)

(T<sub>2</sub>Q)

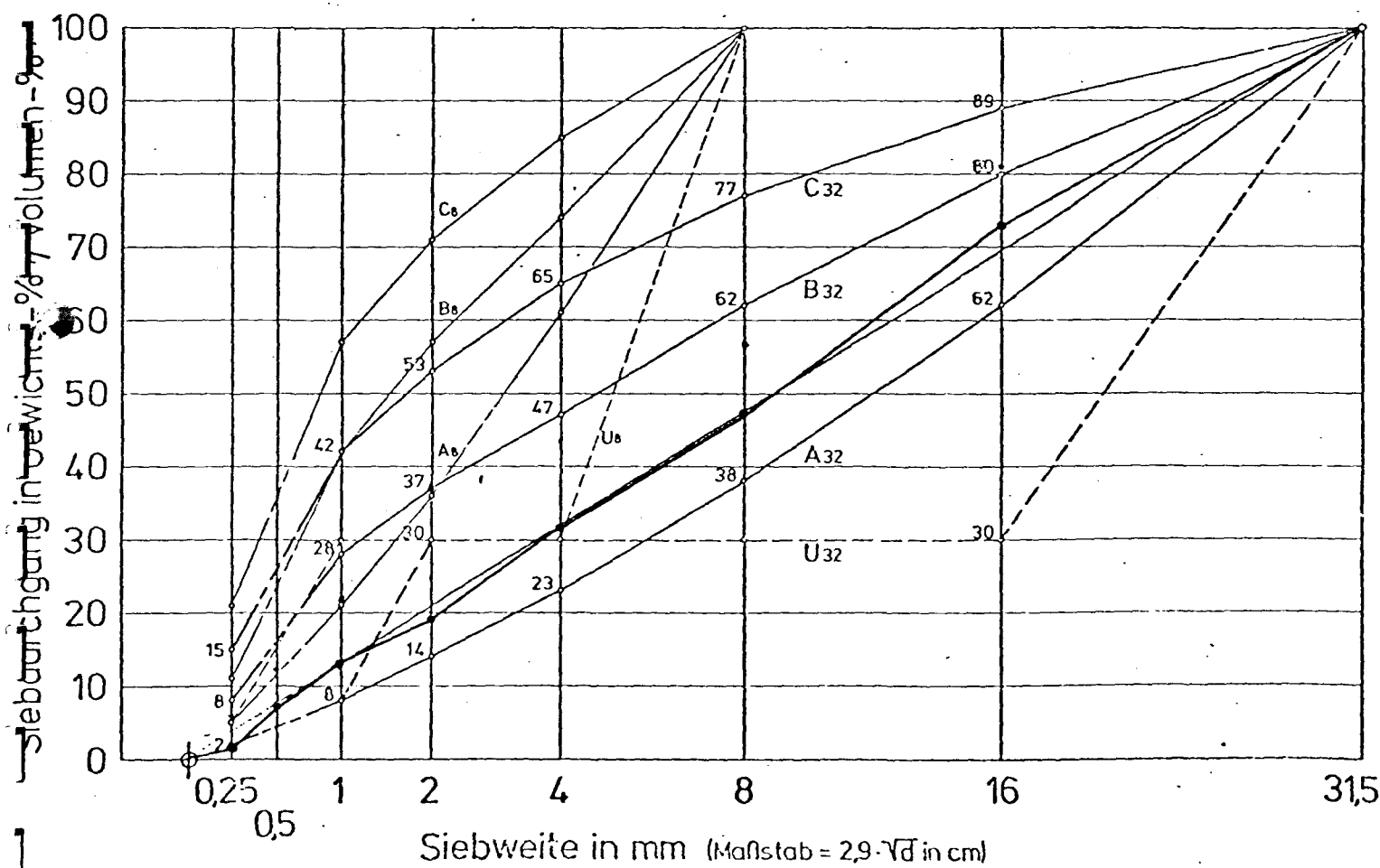
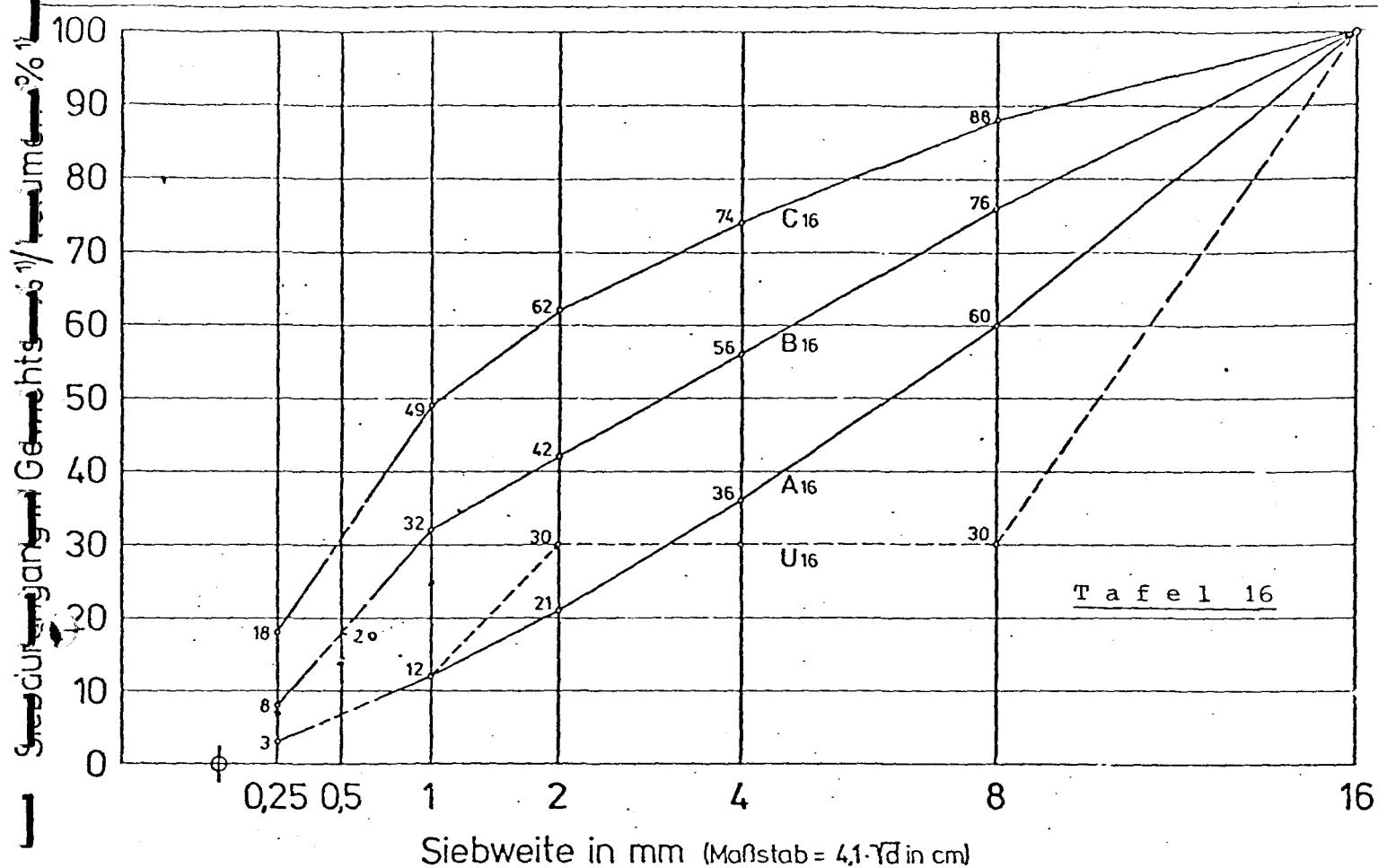
(Unkarschott)



Verlassung " / Werk " / Baustelle "

HHT-Beton

Sieblinie 1



Niederlassung<sup>1)</sup> / Werk<sup>1)</sup> / Baustelle<sup>1)</sup> HHT-Beton Sieblinie 2

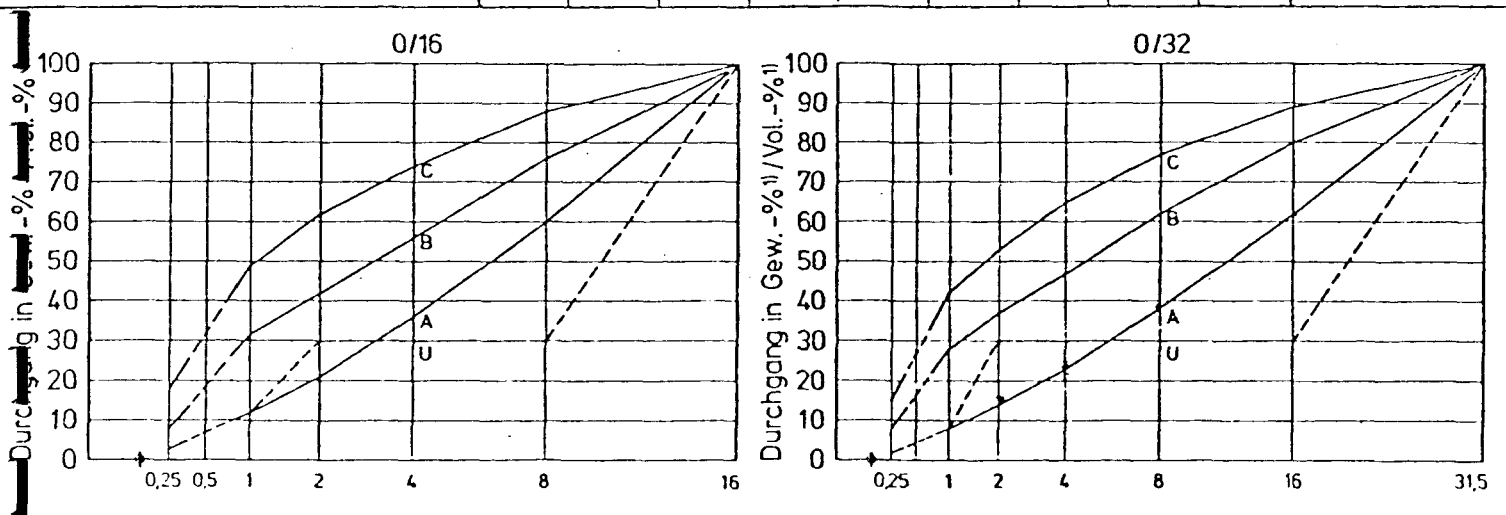
Ergebnisse der Korngruppen

Probe- Kenn- zeichen	Korn- gruppe mm	Zuschlagart	Durchgang in Gewichts-% <sup>1)</sup> /Volumen-% <sup>1)</sup> durch die Siebe									Bemerkungen
			0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5	63	
1												T a f e l 17
2												
3												
4												
5												

Sieblinien

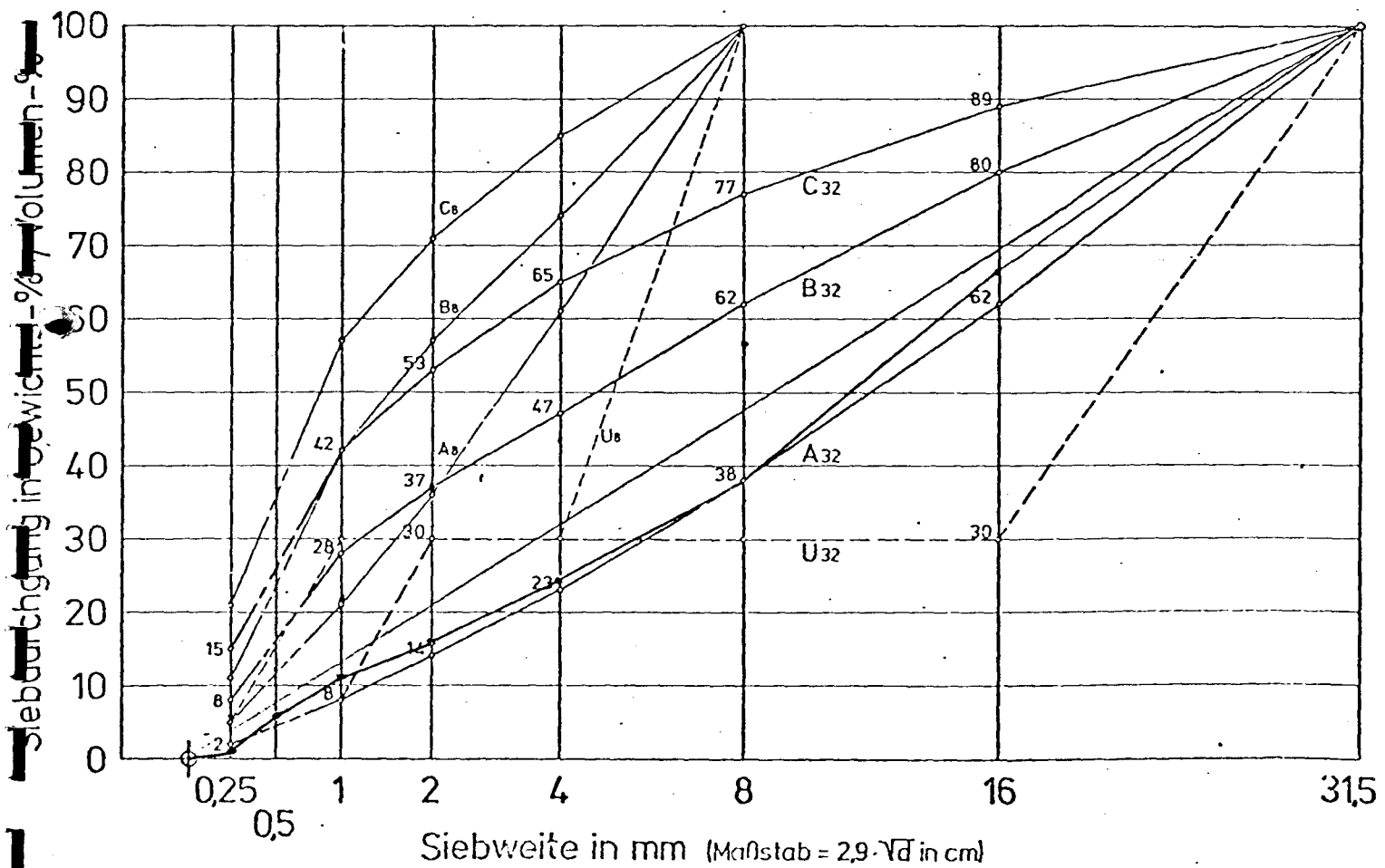
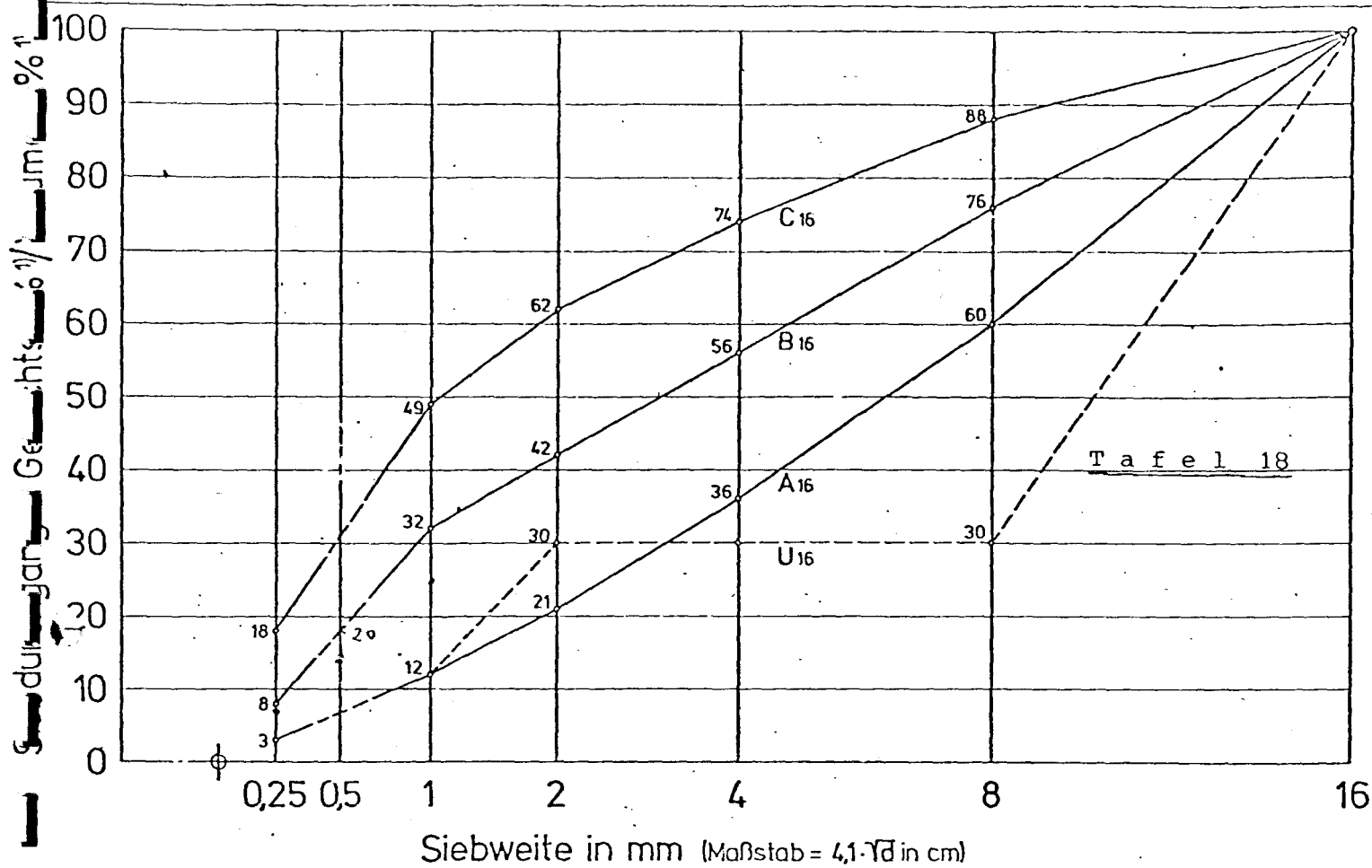
Probe- Kenn- zeichen	Korn- gruppe mm	Anteil %	Durchgang in Gewichts-% <sup>1)</sup> /Volumen-% <sup>1)</sup> durch die Siebe									Sieblinie Nr. ....
			0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5	63	
	0/2	16	0,9	5,7	11,3	14,4	15,9	16	16	16		
	2/4	8				0,4	7,3	8	8	8		
	4/8	12					0,5	11	12	12		
	8/16	9						1	9	9		
	16/32	9						1	8	9		
Summe	16/22	46 100	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	7	13	46		
	Σ		1	5,6	11,4	14,9	23,8	38	66	100		
Sollsieblinie												

Probekenn- zeichen	Korn- gruppe mm	Anteil %	Durchgang in Gewichts-% <sup>1)</sup> / Volumen-% <sup>1)</sup> durch die Siebe								Sieblinie
			0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5	63
1	0/1										
	2	5									
1		12									
16-22	mm	100									
Sollsieblinie											



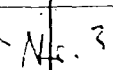
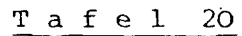
HT-Beton, Sieblinie 2

Niederlassung " / Werk " / Baustelle "





HAT - Beton, Stiehlma 3 m


$$15.4_3$$

(Universal Truth)



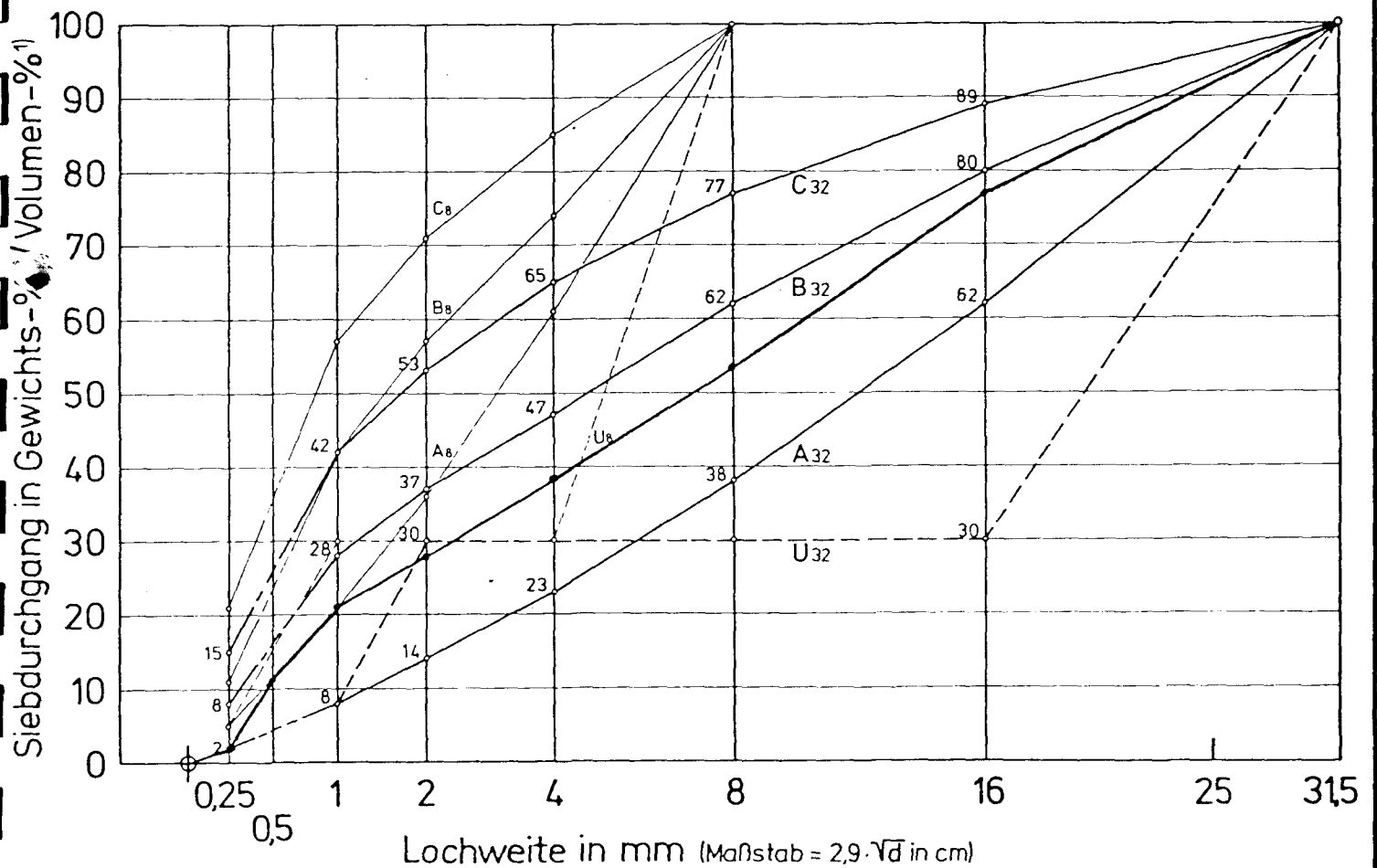
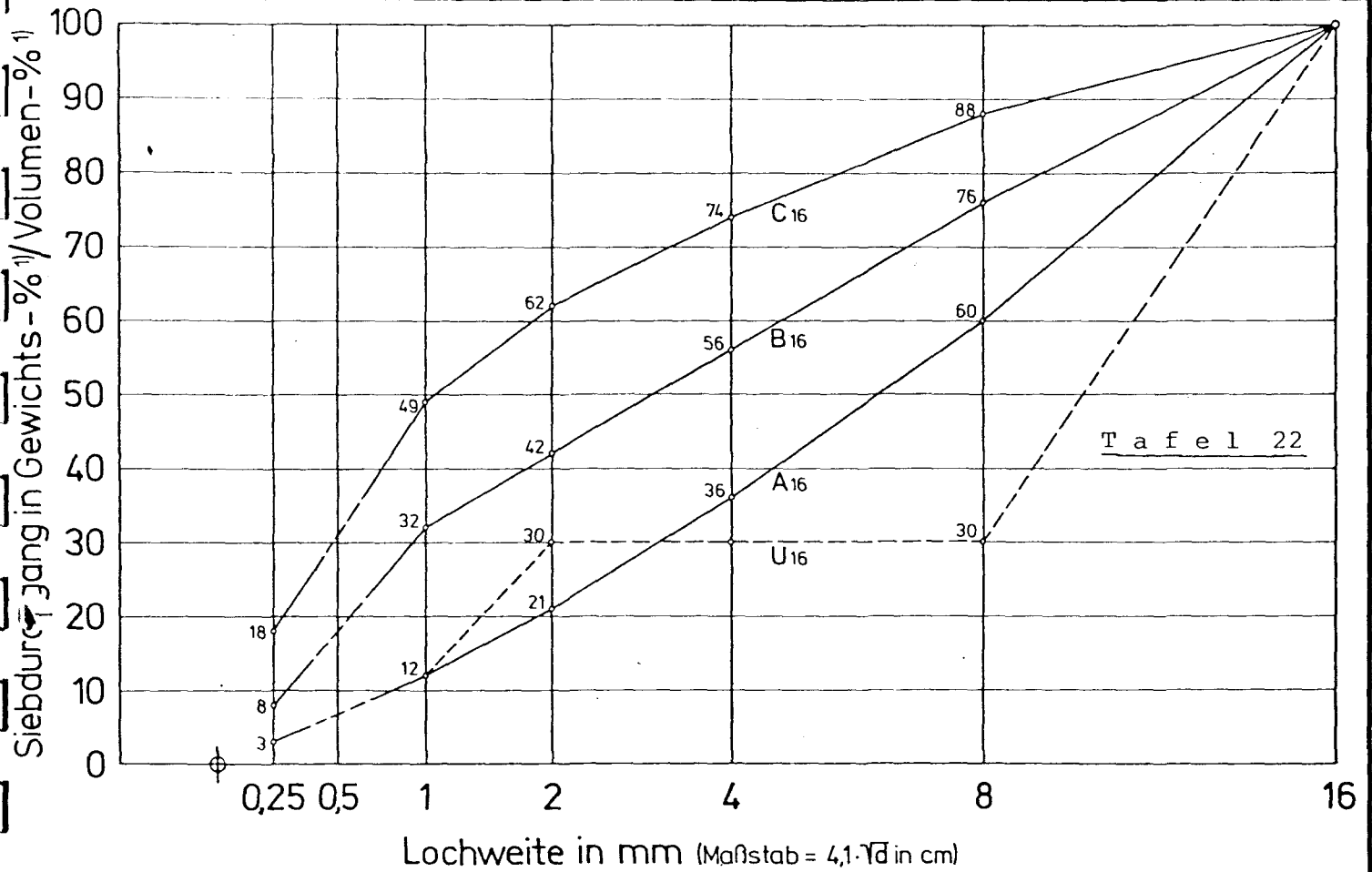
# Betonzuschlag

Sieblinien

6 Blatt Nr. 30

Niederlassung 1) / Werk 1) / Baustelle 1)

H/17- Linie Nr. 117 Sieblinie 5, 11/11



Antragsteller:

- 31 -

Bearb.-Nr.

Lfd.-Nr.

Sachbearbeiter: Dr. Schneider/Weiß

58/3960

189/78

## BETONHERSTELLUNG BLATT I

Versuchskörper: ... HHT-Beton ... A.001-052...

Datum: ... 16.10.78 ...

Prüfer: ... Hoffmann, H. ...

Tafel 23

Baustoffe/m <sup>3</sup> Beton in kg				Baustoffe/1.75 l, ... 2 ... Misch.		
	Zuschl.	Wasser	WZ-	Zement	Zuschlag	Wasser
Art: HDZ 45 L						28,15
Werk: Wülfrather				63,00 kg	341,95 kg	25,90 kg - 4,06 E
Lieferung am: 29.8.78						21,84 kg 2,25 :
soll: 360 + 60 Füllm 1954	148			+ 10,5 kg		24,09 "
ist: 366 bi 1989	164		945	EFA-FÜLLER		+ 1,260 kg BV
Trockene Baustoffe kg: 2476						Accora 1307

Frischbetonrohddichte kg/dm <sup>3</sup>				Baustoffanteil/Mischung		
soll:	ist: 2,580			= 443,60	kg	

Eigenfeuchtigkeit des Betonzuschlages						
Korngruppe:	0/2		0/2	2/8/11	11/16	16/22
Lieferung:	27.1.78	2/4	4/8			
Einwaage g						
Brutto:	3442	3437	3436			
Tara:	1442	1437	1436			
Netto:	2000	2000	2000			
Auswaage g						
Brutto:	3385	3408	3410	Trockene Körnung!		
Tara:	1442	1437	1436			
Netto:	1943	1971	1974			
Verlust g:	57	29	26			
Feuchte %:	2,93	1,47	1,32			

Aufteilung des Betonzuschlages				Basalt		
Korngruppe:	0/2	2/4	0/2 4/8	2/8/11	11/16	16/22
Anteil %:	30	11	11	9	9	30
Zuschlag tr.:	102,59	3761	3761	30,78	30,78	102,58
Feuchtigk. kg:	3,01	0,55	0,50			
Einwaage kg:	105,60	3816	3811	30,78	30,78	102,58



Versuchskörper: HHT-Beton A 001 - 052 Datum: 16.10.78

### Frischbetonwerte

	1. M.		2. Mischung	
	ohne BV	m. BV	ohne BV	m. BV
1. Ausbreitmaß cm:	—	36,0	—	37,5
2. Verdichtungsmaß v:	84 = 1,27	/	702 = 1,24	/
3. <del>Luftgehalt</del> s:	Vebe 4,5	/	Vebe 4,8	/
4. Betonverdichtung:				

Flasche  $\phi$  25,  $\phi$  53 mm, Tisch/Bohle, Stochern, Stampfen.  
Verdichtungszeit: 39. Sek.

5. Frischbetonrohichte kg/dm<sup>3</sup>: 2,58

Form Nr.	M 1						M 2					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Form+Beton	37,52	36,66	37,06	36,34	36,89	36,95	37,15	37,08	37,17	37,63	37,34	37,30
Form leer	16,75	16,00	16,38	16,73	16,29	16,24	16,65	16,59	16,60	17,04	16,76	16,76
Beton	20,77	20,66	20,68	20,61	20,60	20,71	20,50	20,49	20,57	20,59	20,58	20,54
kg/dm <sup>3</sup>	2,60	2,58	2,59	2,58	2,58	2,59	2,56	2,56	2,57	2,57	2,57	2,57

Form Nr.	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Form+Beton												
Form leer												
Beton												
kg/dm <sup>3</sup>												

### 6. Bestimmung des Gesamtwassergehaltes:

(Darrprobe)

Einwaage g

Auswaage g

Wassergehalt

Brutto: /

Brutto: /

g

Tara: /

Tara: /

g

Netto: /

Netto: /

6,79 % (rechm.)

Antragsteller:

Bearb.-Nr.

Lfd.-Nr.

Sachbearbeiter: Dr. Schneider / Weiß

58/3960

224/78

## BETONHERSTELLUNG BLATT I

Versuchskörper: ..... HHT A 053 - 101 .....

Datum: 20. 11. 78

Prüfer: Hoffmann H. ....

Tafel 25

Baustoffe/m<sup>3</sup> Beton in kg

Baustoffe/1.751, .2... Misch.

	Zuschl.	Wasser	WZ-	Zement	Zuschlag	Wasser
Art: HOZ 45L						10,15
Werk: Wülfrather				63,00 kg	341,95 kg	25,90 kg - 4,18 E 21,72 kg + 2,25 " 23,97 kg
Lieferung am: 29. 8. 78						
soll: 360 + 60	1954	148		+ 10,50 kg		
ist: 365	Füller 61 1981	163	0,45	EFA-FÜLLER; helle Bo. sand BM II, BASF, For Block BV		+ 1260 kg Acosal 307
Trockene Baustoffe kg:	2407					

Frischbetonrohddichte kg/dm<sup>3</sup>

soll: ist: 2,570 ✓

Baustoffanteil/Mischung

= 443,60 kg

Eigenfeuchtigkeit des Betonzuschlages

Basalt

Korngruppe:	0/2	0/4	4/8/11	11/16	16/22
Lieferung:	27. 1. 78	2/4	4/8		
Einwaage g					
Brutto:	3437	3436	3442		
Tara:	1437	1436	1442		
Netto:	2000	2000	2000		
Auswaage g					
Brutto:	3386	3385	3416	Trockene Körnung!	
Tara:	1437	1436	1442		
Netto:	1949	1949	1974		
Verlust g:	51	51	26		
Feuchte %:	2,62	2,62	1,32		

Aufteilung des Betonzuschlages Quarz

Basalt

Korngruppe:	0/2	2/4	4/8	8/11	11/16	16/22
Anteil %:	30	11	11	9	9	30
Zuschlag tr.:	102,59	37,61	37,61	30,78	30,78	102,58
Feuchtigk. kg	2,69	0,99	0,50	—	—	—
Einwaage kg:	405,28	3860	3811	30,78	30,78	102,58

Versuchskörper: HHT-Beton A053-101 Datum: 20.11.78

Frischbetonwerte

	1. Mischung		2. Mischung	
	ohne BV	m. BV	ohne BV	m. BV
1. <u>Ausbreitmaß</u> cm:	—	38,5	—	38,0
2. <u>Verdichtungsmaß</u> v:	5,3 : 1,15	✓	5,2 cm : 1,15	✓
3. <u>Luftgehalt</u> % Vebe. 4. sec	4,1 sec	✓	4,5 sec	✓
4. <u>Betonverdichtung</u> :				
Zyl. Ø 8/30 Flasche Ø 25, Ø 33 mm, Tisch, Bohle, Stochern, Stampfen:				
Verdichtungszeit: ..... Sek.				

5. Frischbetonrohichte kg/dm<sup>3</sup>: 2,57

Form Nr.	<u>M. 1</u>						<u>M. 2</u>					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Form+Beton :	27,29	36,52	36,88	37,20	36,85	36,79	37,10	37,08	37,07	37,52	37,24	37,21
Form leer :	16,75	16,50	16,38	16,73	16,29	16,24	16,65	16,59	16,60	17,04	16,76	16,74
Beton :	20,54	20,52	20,50	20,47	20,56	20,55	20,45	20,49	20,47	20,53	20,48	20,5
kg/dm <sup>3</sup> :	2,57	2,57	2,56	2,56	2,57	2,57	2,56	2,56	2,56	2,57	2,56	2,5

Form Nr.	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Form+Beton :												
Form leer :												
Beton :												
kg/dm <sup>3</sup> :												

6. Bestimmung des Gesamtwassergehaltes:  
(Darrprobe)

<u>Einwaage</u> g	<u>Auswaage</u> g	<u>Wassergehalt</u>
Brutto: <u>          </u>	Brutto: <u>          </u>	<u>          </u> g
Tara : <u>          </u>	Tara : <u>          </u>	<u>          </u> %
Netto: <u>          </u>	Netto: <u>          </u>	<u>6,77</u> % (rechm.)

Sachbearbeiter: Dr. Schneider/Weiß 58/3960

190/78

## BETONHERSTELLUNG BLATT I

Versuchskörper: ... HHT-B ... 001-052

Datum: ... 18.10.78

Tafel 27

Prüfer: ... Hoffmann J.

Baustoffe/m<sup>3</sup> Beton in kg

Baustoffe/175,1...2...Misch.

	Zuschl.	Wasser	WZ-	Zement	Zuschlag	Wasser
Art: HOZ 45 L						29,05 kg
Werk: Wülfrather				65,60 kg	347,70 kg	26,30 kg
Lieferung am: 29.8.78				+ 10,50 "		- 3,27 E
soll: 375 + 60 EFA 1986		150		EFA-Füller		23,03 kg
ist: 384 61 EFA 2035		170	0,44			+ 2,75 "
Trockene Baustoffe kg:						25,78 kg
						+ 1,440 kg
						BV
						Acosal 307

Frischbetonrohichte kg/dm<sup>3</sup>

soll: ist: 2,650

Baustoffanteil/Mischung

= 452,85 kg

Eigenfeuchtigkeit des Betonzuschlages

Basalt

Korngruppe:	0/1	0/2	2/8/11	11 & 16	16/22
Lieferung:		27.1.78			
Einwaage g					
Brutto:		3442			
Tara:		1442			
Netto:		2000			
Auswaage g					
Brutto:		3375			
Tara:		1442			
Netto:		1933			
Verlust g:		67			
Feuchte %:		3,47			

Aufteilung des Betonzuschlages

Basalt

Korngruppe:	0/1	0/2	2/8/11	11 & 16	16/22
Anteil %:		30	15	15	40
Zuschlag tr.:		94,20	54,30	54,30	144,90
Feuchtigk. kg:		3,27	-	-	-
Einwaage kg:		97,47	54,30	54,30	144,90

Trockene Körnung!

Probenkür: HHT.B...001-052... Datum: 18.10.78

Frischbetonwerte		1. Mischung	2. M.	1. M.	2. M.
		+ 2,75 W	0.8V	m. BV	m. BV
x 1. Ausbreitmaß cm:	—	—	—	41,0	41,0
x 2. Verdichtungsmaß v:	1,38	1,19	1,21	✓	✓
3. Luftgehalt %	12 sek	4,5 sek	5,5 sek	✓	✓
4. Betonverdichtung:					
Flasche $\phi$ 25, $\phi$ 33 mm		Zyl. $\phi$ 8			
Verdichtungszeit: 30 Sek.		Tisch, Bohle, Stochern, Stampfen			

5. Frischbetonrohichte kg/dm<sup>3</sup>: 2,65

Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Beton	37,92	37,14	37,48	37,88	37,43	37,41	37,80	37,80	37,79	37,24	37,94	37,88
leer	16,75	16,00	16,38	16,73	16,29	16,24	16,65	16,59	16,60	17,04	16,76	16,76
son	21,17	21,14	21,10	21,15	21,14	21,17	21,15	21,21	21,19	21,20	21,18	21,12
$\rho$	2,65	2,64	2,64	2,64	2,64	2,65	2,64	2,65	2,65	2,65	2,65	2,64

Nr.	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Beton												
leer												
son												
$\rho$												

6. Bestimmung des Gesamtwassergehaltes:  
(Darrprobe)

Einwaage g

Auswaage g

Wassergehalt

Brutto: /

Brutto: /

g

Tara : /

Tara : /

%

Netto: /

Netto: /

6,86 % (rechm.)

Antragsteller:

Bearb.-Nr.

Lfd.-Nr.

Sachbearbeiter: Dr. Schneider / Weiß

58/3960

225/78

## BETONHERSTELLUNG BLATT I

Versuchskörper: ..... HHT... B... 0.53... 101.....

Datum: ..... 23. 11. 78.....

T a f e l 29

Prüfer: ... Hoffmann H.....

Baustoffe/m<sup>3</sup> Beton in kg

Baustoffe/175,1, 2.... Misch.

Zuschl.

Wasser

WZ-

Zement

Zuschlag

Wasser

Art: H02 45L

Werk: Wülfrather

Lieferung am:  
29. 8. 78

soll: 375 + 60 Füllm 1986

150

ist: 377 + 60 EFA 2000

173

0,46

65,60 kg

347,70 kg

30,05

26,30 kg

- 2,52 E

23,78 kg

+ 2,75

26,53 kg

+ 1,00

+ 1,440 kg

3V Alcan 130 F

Trockene Baustoffe kg:  
2437Frischbetonrohddichte kg/dm<sup>3</sup>

soll: ist: 2,610/

Baustoffanteil/Mischung

= 453,85 kg

Eigenfeuchtigkeit des Betonzuschlages

Basalt

Korngruppe:

0/1

0/2

8/11

11 16

16/22

Lieferung:

27. 1. 78

Einwaage g

Brutto:

3442

Tara:

1442

Netto:

2000

Auswaage g

Brutto:

3390

Trockene Körnung!

Tara:

1442

Netto:

1948

Verlust g:

52

Feuchte %:

2,67

Aufteilung des Betonzuschlages

Basalt

Korngruppe:

0/1

0/2

8/11

11 16

16/22

Anteil %:

30

15

15

40

Zuschlag tr.:

94,20

54,30

54,30

144,90

Feuchtigk. kg:

2,52

—

—

—

Einwaage kg:

96,72

54,30

54,30

144,90

Versuchskörper: HHT-Beton B. 053-101 Datum: 23. 11. 78

Frischbetonwerte

	1. Mischung		2. Mischung	
	ohne BV	mit BV	ohne BV	mit BV
1. Ausbreitmaß cm:	—	25,0	—	41,0
2. Verdichtungsmaß v:	8,8 cm = 128	—	3,5 cm = 110	—
3. <del>Verdichtungsmaß</del> Vebe	12,0 sek	—	4,0 sek	—
4. Betonverdichtung:				

Flasche  $\phi$  26,  $\phi$  33 mm, Tisch, Bohle, Stochern, Stampfen:  
Verdichtungszeit: 30 Sek. Zylinder  $\phi$  8/30

5. Frischbetonrohichte kg/dm<sup>3</sup>: 2,61

Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Beton	37,59	36,75	37,19	37,57	37,18	37,10	37,55	37,56	37,53	38,03	37,74	37,7
leer	16,75	16,00	16,38	16,73	16,29	16,24	16,65	16,59	16,60	17,04	16,76	16,76
n	20,84	20,75	20,81	20,84	20,89	20,86	20,90	20,97	20,97	20,99	20,98	20,95
/dm <sup>3</sup>	2,61	2,59	2,60	2,61	2,61	2,61	2,61	2,62	2,62	2,62	2,62	2,62

Bemerkung: 1. Mischung lange Mischzeit d. 3x Wasserzugabe:  $\begin{cases} 2,00 \text{ kg} \\ 0,75 \text{ kg} \\ 1,00 \text{ kg} \end{cases}$

Nr.	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Beton												
leer												
n												
/dm <sup>3</sup>												

6. Bestimmung des Gesamtwassergehaltes:  
(Darrprobe)

Einwaage g	Auswaage g	Wassergehalt
Brutto: /	Brutto: /	g
Tara: /	Tara: /	%
Netto: /	Netto: /	7,10 % (rechm.)

## 5. Druckfestigkeit und Rohdichte bei Normaltemperatur (20 °C)

Probekörper:      Würfel 15/15/15 cm, Zylinder 15/30 cm;  
                    2 x 24 Stück für jede Serie

Lagerung:           Wasserlagerung bis zum Prüftermin, Prüfalter: 28, 56 und 90 Tage

Vorbehandlung:   (keine spezielle)

Prüfung:           Druckfestigkeit nach DIN 1048, Rohdichte.

Die nachstehende Tabelle 2 auf Seite 40 gibt die Festigkeitsentwicklung der beiden ausgewählten Betonserien A und B wieder, wobei jeder Zahlenwert dem Mittelwert aus 4 Messungen entspricht. Dabei zeigte sich, daß die geforderte 90-Tage-Zylinderfestigkeit ( $51 \text{ N/mm}^2$ ) von allen Serien schon nach 28 Tagen im Mittel um 19 % bei der Serie A bzw. um 25 % bei der Serie B überschritten wird. Die Festigkeitsentwicklung verlief wie erwartet. Die 90-Tage-Zylinderfestigkeit beträgt im Mittel  $79,5 \text{ N/mm}^2$  für die Serie A und  $76,4 \text{ N/mm}^2$  für die Serie B. Das Verhältnis Würfel- festigkeit zu Zylinderfestigkeit  $\beta_w/\beta_c$  liegt zwischen 0,94 und 1,08.

Bemerkenswert ist noch, daß von allen 96 geprüften Probekörpern nur 2 im Alter von 28 Tagen geprüfte Zylinder in ihren Festigkeiten unterhalb der geforderten 90-Tagefestigkeit von  $51 \text{ N/mm}^2$  lagen. Bei einem Zylinder betrug die 28-Tage-Festigkeit  $45 \text{ N/mm}^2$ , ein aufgrund der zu erwartenden Festigkeitssteigerung bis zum Alter von 90 Tagen ausreichender Wert. Der zweite Zylinder hatte eine 28-Tage-Festigkeit von  $23,8 \text{ N/mm}^2$ . Aufgrund des Bruchbildes und des an einem Reststück durchgeführten Spaltzugversuchs (Spaltzugfestigkeit =  $4,40 \text{ N/mm}^2$ ) kam man zu dem Schluß, daß das vorzeitige Versagen dieses Probekörpers durch nicht ordnungsgemäß geschliffene Endflächen verursacht sein dürfte.

Die Tabelle 3 auf Seite 40 zeigt die ermittelten Rohdichten. Die Streuungen der Rohdichten liegen im üblichen Bereich. Es sind daraus keine Hinweise auf unterschiedliche Verdichtungen bzw. auf Schwankungen in den Zuschlagsrohddichten zu entnehmen. Die am 16. bzw. 18.10.1978 hergestellten Mischungen wiesen in allen Fällen vergleichsweise höhere Rohdichten auf.

Auf Bild 2 (s. Seite 41) ist die Festigkeitsentwicklung der beiden Betonserien eingezeichnet. Den angegebenen Werten der Würfel- und Zylinderfestigkeiten ist die Festigkeit aus der Zementprüfung gegenübergestellt. Die Betonfestigkeit steigt auch nach mehr als 100 Tagen noch deutlich an, was vermutlich u.a. auch auf die darin enthaltene Flugasche zurückzuführen ist.



HHT	$\beta_{w28}$	$\beta_{c28}$	$\beta_{w28}/\beta_{c28}$	$\beta_{w56}$	$\beta_{c56}$	$\beta_{w56}/\beta_{c56}$	$\beta_{w90}$	$\beta_{c90}$	$\beta_{w90}/\beta_{c90}$
	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	-	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	-	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	-
A	62,1 <sup>+) </sup>	55,1	1,13	68,3	73,8	0,93	73,9	80,9	0,91
	60,9	66,5	0,92	74,6	77,2	0,97	75,1	78,0	0,96
Mittelwerte	61,5	60,8	1,03	71,5	75,5	0,95	74,5	79,5	0,94
B	64,5	66,7	0,97	70,1	62,2	1,13	73,5	77,7	0,95
	63,8	60,7	1,05	73,9	71,3	1,04	78,2	75,0	1,04
Mittelwerte	64,2	63,7	1,01	72,0	66,8	1,08	75,9	76,4	1,00

+) Jeder Zahlenwert entspricht einem Mittelwert aus 4 Messungen.

T a b e l l e 3: Rohdichte nach unterschiedlich langer Lagerung

Probekörperbezeichnung HHT-Serie	Probenalter [Tage]	Rohdichte [g/cm <sup>3</sup> ]	
		Würfel	Zylinder
A	28	2,57	2,57
		2,59	2,57
	56	2,58	2,57
		2,59	2,57
	90	2,58	2,57
		2,59	2,56
B	28	2,63	2,63
		2,66	2,65
	56	2,64	2,63
		2,67	2,65
	90	2,63	2,62
		2,66	2,65

Druckfestigkeit in MPa

80

60

40

20

10

20

30

40

50

100

→ Alter in Tagen

Zementfestigkeit (HOZ 45 L)  
(16 x 4 x 4 cm<sup>3</sup>)

HHT Beton

(Mittelwerte aus 8 Einzelwerten)

Würfel  
Zyl.

Mischung A vom 16.10. und 20.11.78

Würfel  
Zyl.

Mischung B vom 18.10. und 23.11.78

Bild 2: Verlauf der Betonfestigkeit  
(Wasserlagerung)

6. Kalte Restdruckfestigkeit und Rohdichte von unversiegelten Probekörpern  
nach Dauertemperatur von 250 °C

Standzeit: 28 Tage bei 250 °C

Probekörper: Zylinder 15/30 cm; 2 x 3 Stück

Lagerung: 90 Tage Wasserlagerung

Vorbehandlung: Aufheizung mit 5 °C/h auf 250 °C, Standzeit 28 Tage, geregelte Abkühlung mit 5 °C/h bis ca. 90 °C; danach lag die natürliche Abkühlung des Ofens unter 5 °C/h. Nach 24 h war die Probertemperatur von 90 °C auf ca. 25 °C abgesunken. Anschließend Entnahme der Probekörper aus dem Ofen und Ermittlung von Rohdichte und Festigkeit. Während der thermischen Behandlung wurden die Ofenlufttemperaturen mit 3 Thermoelementen und die Probenoberflächentemperaturen mit 3 Thermoelementen laufend registriert.

Prüfung: Zylinderdruckfestigkeit nach DIN 1048, Rohdichte.

Die Ergebnisse sind aus der nachfolgenden Tabelle 4 auf Seite 43 ersichtlich. Im Mittel lagen die Festigkeitswerte der Serien A und B noch um 5,4 bzw. 4,3 N/mm<sup>2</sup> ( $\approx 10,6$  bzw. 8,4%) über dem geforderten Wert von 51 N/mm<sup>2</sup>. Keiner der geprüften 6 Zylinder hatte eine Festigkeit unter 51 N/mm<sup>2</sup>. Der niedrigste Festigkeitswert lag bei 52,5 N/mm<sup>2</sup>. Insgesamt sank die Zylinderfestigkeit, und zwar für beide Serien nahezu im gleichen Verhältnis auf 71 % (Serie A) bzw. 72 % (Serie B), bezogen auf die "kalte" Zylinderdruckfestigkeit nach 90 Tagen Wasserlagerung.

Die Dichte der Proben sank auf 2,42 g/cm<sup>3</sup> (Serie A) bzw. 2,49 g/cm<sup>3</sup> (Serie B), was für beide Serien einer Dichteminderung von 0,15 g/cm<sup>3</sup> entspricht. Der Absolutwert von 2,49 g/cm<sup>3</sup> ist vergleichsweise hoch und wird als vorteilhaft erachtet.

Tabelle 4: Festigkeit und Rohdichte nach 28 Tagen Standzeit bei 250 °C

Probekörper- Bezeichnung HHT	$\beta_{c, \text{Rest}}$ in N/mm <sup>2</sup>	$\rho$ in g/cm <sup>3</sup>
A 025	56,6	2,415
A 026	56,9	2,427
A 027	55,7	2,413
Mittelwert	56,4	2,418
B 025	57,6	2,490
B 026	56,0	2,497
B 027	52,5	2,470
Mittelwert	55,3	2,486

Standzeit: 7 Tage bei 250 °C

Probekörper: Zylinder 15/30; 2 x 3 Stück

Lagerung: 90 Tage Wasserlagerung

Vorbehandlung: Aufheizung mit 5 °C/h auf 250 °C, Standzeit 7 Tage, Entnahme aus dem Ofen zur Abkühlung in eine gut wärmeisolierte Thermo-  
box, die Anfangsabkühlgeschwindigkeit von ca. 10 °C/h sank  
nach ca. 10 h auf 5 °C/h. Nach insgesamt 72 h waren 25 °C  
Probentemperatur erreicht. Danach erfolgte die Entnahme der  
Proben aus der Thermobox zur Ermittlung von Rohdichte und Fe-  
stigkeit. Während der thermischen Behandlung wurden die Ofen-  
lufttemperatur mit 3 Thermoelementen und die Probenoberflächen-  
temperaturen mit 6 Thermoelementen laufend registriert.

Prüfung: Zylinderdruckfestigkeit nach DIN 1048, Rohdichte.

Die Ergebnisse sind in der nachstehenden Tabelle 5 auf Seite 44 dargestellt.  
Im Mittel lagen auch hier die Festigkeitswerte der Serien A und B noch um  
5,8 N/mm<sup>2</sup> ( $\approx$  11,4 %) bzw. 6,2 N/mm<sup>2</sup> ( $\approx$  12,2 %) über dem geforderten Wert von  
51 N/mm<sup>2</sup>. Lediglich ein Probekörper der Serie B lag mit 49,9 N/mm<sup>2</sup> 3,1 % unter  
der geforderten Zylinderdruckfestigkeit. Die genaue Ursache dafür konnte nicht  
ermittelt werden; es wird vermutet, daß die Endflächen nicht ausreichend plan-  
parallel waren.

Insgesamt sank die Festigkeit durch die 7-tägige Temperaturbeanspruchung bei 250 °C auf 71 % (Serie A) bzw. 75 % (Serie B), bezogen auf die Zylinderfestigkeit wassergelagerter Betonproben gleichen Alters. Offenbar ist für die Festigkeitsminderung also weniger die Dauer der Temperatureinwirkung entscheidend, sondern vielmehr die absolute Höhe der einwirkenden Temperatur.

Die Dichte der Proben nimmt im gleichen Rahmen wie bei 28-tägiger Temperaturbeanspruchung ab. Bei der Serie B stimmen beide Werte ( $- 0,15 \text{ g/cm}^3$ ) überein, bei der Serie A beträgt die Dichteabnahme  $0,12 \text{ g/cm}^3$  gegenüber  $0,15 \text{ g/cm}^3$  bei 28-tägiger Temperierung. Diese Unterschiede dürften jedoch mehr aus Exemplarstreuungen als aus tatsächlich stärkerer Wasserabgabe resultieren.

Tabelle 5: Festigkeit und Rohdichte nach 7 Tagen Standzeit bei 250 °C

Probekörper- Bezeichnung HHT	$\beta_{c, \text{Rest}}$ in $\text{N/mm}^2$	$\rho$ in $\text{g/cm}^3$
A 028	56,3	2,409
A 029	56,9	2,450
A 033	57,2	2,486
Mittelwert	56,8	2,45
B 028	49,4	2,486
B 029	64,4	2,494
B 033	57,7	2,487
Mittelwert	57,2	2,49
Lausanne	35,3	2,320

7. Kalte Restdruckfestigkeit und Rohdichte von unversiegelten Probekörpern  
nach 5 Temperaturzyklen (20 - 200 - 20 °C)

Probekörper: Zylinder 15/30 cm; 2 x 6 Stück

Lagerung: 90 Tage Wasserlagerung

Vorbehandlung: Die Probekörper wurden mit 5 °C/h auf 200 °C aufgeheizt. Dann wurde die Temperatur 12 h auf 200 °C gehalten und danach mit 5 °C/h auf ca. 80 °C abgekühlt. Danach wurde der Ofen etwas geöffnet, und die Proben kühlten mit abnehmender Abkühlgeschwindigkeit im Mittel mit 2,0 °C/h auf ca. 35 °C ab. Nach weiteren 12 h erfolgte eine Abkühlung auf ca. 30 °C, danach, d. h. nach 108 h Versuchsdauer, begann der nächste Temperaturzyklus. Die Ofenlufttemperaturen wurden mit Hilfe von 3 Thermoelementen und die Probekörperoberflächen mit 9 Thermoelementen laufend registriert.

Prüfung: Zylinderfestigkeit nach DIN 1048, Rohdichte.

Die Ergebnisse zeigt die nachstehende Tabelle 6 auf Seite 46. Infolge der zyklischen Temperatureinwirkung wurde die Zylinderdruckfestigkeit auf das 0,79-fache (Serie A) bzw. 0,81-fache (Serie B) der Zylinderdruckfestigkeit wassergelagerter Betonproben gleichen Alters (90 Tage) herabgesetzt. Im Mittel lagen die Betonfestigkeiten der Serie A um  $12,2 \text{ N/mm}^2$  ( $\approx 23,9 \%$ ) und der Serie B um  $11,2 \text{ N/mm}^2$  ( $\approx 22,0 \%$ ) über der geforderten Zylinderdruckfestigkeit von  $51 \text{ N/mm}^2$ . Kein Probekörper wies Festigkeiten unterhalb des geforderten Wertes auf. Der niedrigste Einzelwert lag noch um  $9 \text{ N/mm}^2$  ( $\approx 17,6 \%$ ) über  $51 \text{ N/mm}^2$ .

Im Vergleich mit den Dauerstandsversuchen bei 250 °C ist der Abfall der Zylinderdruckfestigkeit bei den zyklisch bis 200 °C beanspruchten Probekörpern deutlich geringer ausgefallen, das bedeutet, daß bei den hier aufgeprägten, recht niedrigen Aufheiz- und Abkühlgeschwindigkeiten allein die Maximaltemperatur den Festigkeitsverlust bestimmt und daß dieser Festigkeitsverlust schon beim ersten Temperaturzyklus eintritt, und zwar nahezu unabhängig von der Temperaturstandzeit.

Die Dichteminderung lag im Mittel bei  $0,14 \text{ g/cm}^3$  (Serie A) bzw.  $0,15 \text{ g/cm}^3$  (Serie B). Sie unterscheidet sich bei der Serie B überhaupt nicht von den bei Temperaturdauerlagerung (Standzeit 28 bzw. 7 Tage) bei  $250^\circ\text{C}$  gemessenen Werten. Bei der Serie A sind die gemessenen Unterschiede,  $-0,15 \text{ g/cm}^3$  nach 28-tägiger Standzeit bei  $250^\circ\text{C}$ ,  $-0,13 \text{ g/cm}^3$  nach 7-tägiger Standzeit bei  $250^\circ\text{C}$  und  $-0,14 \text{ g/cm}^3$  nach zyklischer Temperaturbeanspruchung bis  $200^\circ\text{C}$ , nach Betrachtung der Einzelwerte der Rohdichten vermutlich eher auf Versuchsstreuungen als auf Zeit- oder Temperatureffekte zurückzuführen.

Tabelle 6: Festigkeit und Rohdichte nach 5 Temperaturzyklen ( $20 - 200 - 20^\circ\text{C}$ )

Probekörper- bezeichnung HHT	$R_{c, \text{Rest}}$ in $\text{N/mm}^2$	$\rho$ in $\text{g/cm}^3$
A 078	64,2	2,426
A 079	63,4	2,432
A 081	61,9	2,418
Mittelwert	63,2	2,43
B 078	63,5	2,494
B 079	63,2	2,488
B 081	60,0	2,498
Mittelwert	62,2	2,49

8. Kalte Restdruckfestigkeit und Rohdichte von unversiegelten Probekörpern nach  
10 Temperaturzyklen (20 - 70 - 20 °C)

Probekörper: Zylinder 15/30 cm; 2 x 3 Stück

Lagerung: 90 Tage Wasserlagerung

Vorbehandlung: Die Proben wurden dem Wasserlagerungsbecken entnommen, mit Tüchern abgetrocknet (oberflächentrocken), gewogen und in den Klimaschrank gelegt. Anschließend wurden sie mit 5 °C/h auf 70 °C aufgeheizt, 14 h bei 70 °C gehalten und mit 5 °C/h auf 20 °C abgekühlt, so daß sich ein Temperaturzyklus von 48 h ergab. Die relative Luftfeuchtigkeit im Klimaschrank wurde fortlaufend gemessen. Sie betrug ca. 10 - 15 % bei 70 °C und ca. 45 - 65 % bei 20 °C. Ein Luftaustausch mit der Umgebung war über das Entlüftungsröhr (Ø 15 mm) jederzeit möglich.

Prüfung: Zylinderfestigkeit nach DIN 1048, Rohdichte

Die zyklische thermische Beanspruchung bis 70 °C ohne Behinderung der Austrocknung ergab im wesentlichen keine Festigkeitsverluste, sondern leichte Festigkeitsgewinne (Serie A: 3 %, Serie B: 1 %), die u. U. auch mit der Nacherhärtung infolge des zunehmenden Betonalters bei der Temperatureinwirkung (90 Tage Wasserlagerung + 20 Tage zyklische Temperaturbelastung) erklärbar sind. Die Meßergebnisse sind auf Tabelle 7 zusammengestellt.

Die geringe Abnahme der Dichte um 1,9 % (Serie A) bzw. 1,1 % (Serie B) ist auf die normale diffusionsbedingte Austrocknung der bis zum Beginn der zyklischen Temperaturbeanspruchung wassergelagerten Proben zurückzuführen.



Tabelle 7: Festigkeit und Rohdichte nach 10 Temperaturzyklen (20 - 70 - 20 °C)

Probekörper- bezeichnung HHT	$\beta_{c, \text{Rest}}$ in $\text{N/mm}^2$	$\rho$ in $\text{g/cm}^3$
A O30	79,9	2,531
A O31	81,0	2,503
A O32	83,5	2,513
Mittelwert	81,5	2,516
B O30	77,1	2,609
B O31	73,2	2,610
B O32	81,2	2,600
Mittelwert	77,2	2,606

9. Kalte Restdruckfestigkeit und Rohdichte von versiegelten Probekörpern nach  
10 Temperaturzyklen (20 - 70 - 20 °C)

Probekörper: Zylinder 15/30 cm; 2 x 3 Stück

Lagerung: 90 Tage Wasserlagerung

Vorbehandlung: Die Probekörper wurden den Wasserlagerungsbecken entnommen, mit Tüchern abgetrocknet (oberflächentrocken), gewogen und in den Klimaschrank gelegt. Anschließend wurden sie mit 5 °C/h auf 70 °C aufgeheizt, 14 h bei 70 °C gehalten und mit 5 °C/h auf 20 °C abgekühlt, so daß sich ein Temperaturzyklus von 48 h ergab. Die relative Luftfeuchtigkeit wurde während der 10 Zyklen konstant auf 98 % gehalten.

Prüfung: Zylinderfestigkeit nach DIN 1048, Rohdichte.

Die Ergebnisse der Festigkeitsprüfungen nach 10 Temperaturzyklen bis 70 % bei Behinderung der Austrocknung (vgl. nachstehende Tabelle 8 auf Seite 49) unterscheiden sich nur sehr gering von den Ergebnissen, die nach 10maliger zyklischer Temperaturbeanspruchung bei 70 °C ohne Behinderung der Austrocknung gewonnen wurden. Während im letzten Fall die Austrocknung eine leichte Festigkeitssteigerung ergab, fiel bei Behinderung der Austrocknung die Festigkeitssteigerung

sehr viel geringer aus (Serie A: 1 % Festigkeitssteigerung bei Behinderung der Austrocknung - 3 % Festigkeitssteigerung ohne Behinderung der Austrocknung), bzw. es trat eine geringe Festigkeitsminderung (Serie B: - 3 % Festigkeitssteigerung mit Behinderung der Austrocknung - + 1 % Festigkeitssteigerung ohne Behinderung der Austrocknung) auf.

Die Änderungen der Rohdichten fielen, bedingt durch die Austrocknungsbehinderung, erwartungsgemäß gering aus (Serie A:  $\Delta \rho = - 0,17 \%$ ; Serie B:  $\Delta \rho = - 0,23 \%$ ). Sie sind praktisch zu vernachlässigen. Die Versuche sind mit solchen Versuchen vergleichbar, in denen die Proben unter versiegelten Bedingungen geprüft werden.

Tabelle 8: Kalte Restdruckfestigkeit und Rohdichte von "versiegelten" Probekörpern nach 10 Temperaturzyklen (20 - 70 - 20 °C)

Probekörperbezeichnung	Gewicht vor Versuchsbeginn [kg]	Gewicht nach Versuchsende [kg]	$\beta_{c, \text{Rest}}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Rohdichte [g/cm <sup>3</sup> ]
A 082	13,46	13,50	80,1	2,564
A 084	13,48	13,49	78,4	2,570
A 085	13,47	13,50	81,3	2,551
Mittelwert	13,47	13,50	79,9	2,562
B 082	13,81	13,84	73,9	2,633
B 084	13,80	13,84	76,6	2,637
B 085	13,84	13,88	71,1	2,618
Mittelwert	13,82	13,85	73,9	2,629

#### 10. Statischer E-Modul bei Normaltemperatur (20 °C)

Probekörper: Zylinder 15/35 cm; 2 x 3 Stück  
 Lagerung: 90 Tage Wasserlagerung  
 Prüfung: Statischer E-Modul nach DIN 1048

Die Ergebnisse der E-Modul-Messungen sind in der nachfolgenden Tabelle 9 (s. Seite 50) dargestellt. Es handelt sich dabei um E-Moduln, die aus der Sekantensteigung des Belastungszweigs der  $\sigma$ - $\epsilon$ -Linie während des 11. Lastspiels

nach DIN 1048 gewonnen wurden. Die Meßlänge für die Bestimmung der Verformung betrug 20 cm. Die Dehnungen wurden mit zwei induktiven Dehnungsaufnehmern gemessen. Die Bestimmung der Kraft erfolgte über einen Öldruckaufnehmer und parallel dazu mit einem Pendelmanometer. Da der Belastungszyylinder in Prüfzylinderqualität ausgeführt ist, dürften die Fehler bei der Kraftmessung  $< 1 \%$  liegen. Die Fehler bei der Dehnungsmessung sind ebenfalls mit  $< 1 \%$  anzusetzen.

Da die E-Moduln (Serie A:  $50,1 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$ ; Serie B:  $51,8 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$ ) jedoch zunächst recht hoch erschienen, wurden die E-Modul-Messungen an einem Zylinder 15/35 und einem Zylinder 8/30 cm der Serie A wiederholt. Als Dehnungsaufnehmer dienten diesmal jeweils 4 Dehnungsmeßstreifen (Meßlänge 6 cm). Da zur Bestimmung des E-Moduls der beiden Zylinder 2 unterschiedliche Prüfmaschinen benutzt wurden, die Ergebnisse jedoch recht gut übereinstimmten (Zylinder 8/30, Probekörper A 099,  $E = 51,9 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$ ; Zylinder 15/35, Probekörper A 087,  $E = 51,9 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$ ), kann davon ausgegangen werden, daß außerhalb der Genauigkeitsklassen der Prüfmaschinen und Dehnungsmeßgeräte keine größeren systematischen Fehler vorliegen und die gemessenen Werte den tatsächlichen Verhältnissen entsprechen.

Tabelle 9: Elastizitätsmodul nach 90 Tagen Wasserlagerung

Probekörper- bezeichnung	$\beta_{c,90}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	E-Modul [ $10^3 \text{ N/mm}^2$ ]	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]
A 088	77,3	50,8	2,558
A 090	78,7	50,1	2,574
A 091	76,4	49,5	2,565
Mittelwert	77,5	50,1	2,566
B 088	74,3	53,6	2,639
B 090	74,6	50,3	2,615
B 091	77,2	51,6	2,638
Mittelwert	75,4	51,8	2,631

11. Statischer E-Modul von unversiegelten Probekörpern bei Versuchshöchsttemperatur (250 °C)

Probekörper: Zylinder 8/30 cm; 2 x 3 Stück (+ 2 x 3 Stück Kaltversuche zur besseren Vergleichbarkeit wegen der gegenüber den 15/30 cm Zylindern unterschiedlichen Schlankheit)

Lagerung: 90 Tage Wasserlagerung

Vorbehandlung: Die Proben wurden dem Wasserlagerungsbecken entnommen, 1 h an der Luft getrocknet (oberflächentrocken) und in den Hochtemperaturprüfstand eingebaut. Anschließend wurden sie mit 1,5 K/min aufgeheizt (Betonoberflächentemperatursteigung), eine Stunde bei 250 °C homogenisiert und danach geprüft.

Prüfung: Statischer E-Modul in Anlehnung an DIN 1048.

Die Elastizitätsmoduln wurden in einer speziellen Hochtemperatur-Prüfanlage ermittelt. Diese Apparatur lieferte für alle bisher untersuchten Betone mit Betongüten bis B 45 zuverlässige Werte; sowohl bei erhöhten Temperaturen bis 800 °C als auch bei Zimmertemperatur. Für die hier untersuchten Betone mit Druckfestigkeiten bis  $86 \text{ N/mm}^2$  war jedoch das System aufgrund der im Vergleich zur Prüfmaschinensteifigkeit sehr hohen Steifigkeit der Betonproben nicht geeignet und lieferte zu niedrige E-Moduln, wie Untersuchungen der E-Moduln an einer anderen Prüfmaschine zeigten. Die in dem Vorabbericht vom April 1979 angegebenen E-Moduln bei 20 °C sind deshalb nicht mehr gültig. Dies betrifft die Werte der Probennummern A 043, A 047, A 050, B 043, B 047 und B 050).

Nach Einbau einer Kalotte im Druckstempel und einer Modifizierung des Wegaufnehmer-Systems konnten die Schwierigkeiten behoben werden. Vergleichsmessungen zwischen den Hochtemperaturprüfanlagen und den anderen Prüfmaschinen zeigten nun eine hinreichend gute Übereinstimmung (Unterschiede für Weg- bzw. Kraftmessung  $< 1 \%$ ). So wurden nach dem Umbau in der Hochtemperaturprüfanlage für den E-Modul der Serie A (bei 20 °C)  $51,6 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$  gemessen; ein Wert, der (auch aufgrund des höheren Betonalters) nur geringfügig über dem Wert liegt, der an Probekörpern 15/35 cm gemessen wurde (Serie A:  $E = 50,1 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$ ). Für die Serie B ergaben sich ähnliche Werte. So liegt der an dem Zylinder 8/30 gemessene Wert  $E = 54,9 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$  aufgrund des höheren Betonalters auch hier geringfügig über dem Wert für die Zylinder 15/30 cm ( $E = 51,8 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$ ).

Die mit dem "alten" Aufbau der Hochtemperaturprüfanlage bei der Versuchshöchsttemperatur (250 °C) ermittelten Kennwerte stimmen dagegen gut mit den Werten überein, die später auch mit dem "neuen" Aufbau erzielt wurden (vgl. Ergebnisse der Probekörper O98 mit denen der Probekörper O44, O48, O51 der Serie A bzw. B), so daß die Ergebnisse aus den ersten Messungen als weiterhin gültig angesehen werden. Im Vergleich zu den Dauerstandsversuchen (s. Abschnitt 12) zeigt sich die Tendenz, daß der quarzärmere Beton (Serie B) im Vergleich zum quarzreicheren Beton (Serie A) einen höheren relativen Abfall des E-Moduls aufweist. Andererseits fällt bei beiden Serien der E-Modul weniger stark ab als bei den Probekörpern, die für einige Tage Dauertemperaturen von 250 °C unterworfen waren und deren E-Modul nach dem Abkühlen im kalten Zustand ermittelt wurde. Die Dauerbeanspruchung insbesondere jedoch die Abkühlung bewirken offenbar einen zusätzlichen Abfall im E-Modul. Die ermittelten E-Moduln sind in der nachfolgenden Tabelle 10 aufgeführt.

Tabelle 10: Statischer Elastizitätsmodul bei 250 °C

Probekörper- bezeichnung HHT	$\beta_{c,90}$ in N/mm <sup>2</sup>	$\epsilon_{\text{Bruch}}$ in %	E-Modul in 10 <sup>3</sup> N/mm <sup>2</sup>	Temperatur in °C
A 099 +)	67,8	1,70	53,4	20
A 100 +)	77,6	1,85	49,7	20
A 098 +)	-	-	51,9	20
Mittelwert	72,7	1,78	51,6	20
A 044	42,3	2,60	25,0	250
A 048	54,7	2,74	26,7	250
A 051	54,4	2,90	25,4	250
A 098 +)	52,3	2,91	21,9	250
Mittelwert	50,9	2,79	24,8	250
B 098 +)	-	-	54,9	20
B 044	42,3	2,30	26,1	250
B 048	40,2	2,66	17,0	250
B 051	45,4	2,80	24,1	250
B 098 +)	54,7	2,52	26,8	250
Mittelwert	45,7	2,57	23,5	250

+) Die Proben wurden mit dem verbesserten Längenmeßsystem im Versuchsalter von ca. 210 Tagen geprüft. Der Probekörper A 100 wurde bis zur Versuchsdurchführung ca. 14 Tage lang nach dem Anbringen der Dehnungsmeßstreifen im Klimaraum bei Normklima 20 °C/65 % rel. Luftfeuchte gelagert.

12. Statischer E-Modul von unversiegelten Probekörpern nach Temperaturbelastung  
im kalten Zustand (20 °C)

Probekörper: Zylinder 15/30 cm; 2 x 9 Stück plus 2 x 3 Stück  
(unterschiedliche Standzeiten bei 250 °C)

Lagerung: 90 Tage wassergelagert

Probekörper	Vorbehandlung
A 030, 031, 032 B 030, 031, 032	Temperaturzyklen 20 - 70 - 20°C ohne Behinderung der Austrock- nung, vgl. Abschnitt 8
A 078, 079, 081 B 078, 079, 081	Temperaturzyklen 20 - 200 - 20°C vgl. Abschnitt 7
A 025, 026, 027 B 025, 026, 027	Dauertemperatur 250 °C 28 Tage Standzeit, vgl. Ab- schnitt 6
A 028, 029, 033 B 028, 029, 033	Dauertemperatur 250 °C 7 Tage Standzeit, vgl. Abschnitt 6

Prüfung: Statischer E-Modul nach DIN 1048 bei 20 °C

Die Ergebnisse der E-Modulmessungen sind in der nachfolgenden Tabelle (s. Seite 55) dargestellt. Auffallend ist die geringe Streuung der Meßwerte. Sie beträgt als größte Abweichung eines Wertes vom Mittelwert 5 %. Alle anderen E-Moduln weichen um weniger als 4,5 % von den jeweiligen Mittelwerten ab. Ausgenommen bei dieser Betrachtung sind die Probekörper A 028, 029, 033 und B 028, 029, 033, die nach einer 7-tägigen Temperaturstandzeit (250 °C) dem Ofen heiß entnommen wurden und in einer isolierten Thermobox weiter abkühlten. Offenbar führten der Temperaturschock während der Entnahme und auch die für den einzelnen Probekörper unterschiedlichen thermischen Verhältnisse in der Thermobox zu erhöhten Streuungen. Die Abweichungen vom Mittelwert betragen hier für die Serie A 15 % (1 Probekörper) bzw. 8,4 % (2 Probekörper) und 6 % (1 Probekörper) bzw. 3 % (2 Probekörper). Im Mittel wurden dagegen keine Verringerungen der E-Moduln im Vergleich zu den nach 28-tägiger Standzeit bei

250 °C Dauertemperatur ermittelten Werten festgestellt. Der mittlere E-Modul betrug jeweils  $20,1 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$  (Serie A) bzw.  $19,5 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$  (Serie B), während die 7-tägige Temperierung mittlere E-Moduln von  $19,1 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$  (Serie A) bzw.  $19,9 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$  (Serie B) ergab.

Vergleicht man die Meßergebnisse der zyklisch beanspruchten Probekörper mit denen der dauerbeanspruchten Proben, so gewinnt man auch hier den Eindruck, daß die Abnahme des E-Moduls fast ausschließlich eine Funktion der Höchsttemperatur ist und kaum davon abhängt, ob die Probekörper zyklisch oder dauernd der Höchsttemperatur ausgesetzt sind. Andererseits reagiert der E-Modul recht empfindlich auf Temperaturerhöhungen. So sinkt der E-Modul schon bei 70 °C Höchsttemperatur auf 82,2 % (Serie A) bzw. 75,1 % (Serie B) des Ausgangswertes bei Raumtemperatur, während bei 200 °C Höchsttemperatur ein Abfall auf 47,5 % (Serie A) bzw. 42,5 % (Serie B) zu beobachten ist. Bei 250 °C Höchsttemperatur sinkt der E-Modul schließlich auf 39,1 % (Serie A) bzw. 38,0 % (Serie B).

Tabelle 11: Statischer E-Modul von unversiegelten Probekörpern nach Temperaturbelastung

Probekörper- bezeichnung HHT	E-Modul [10 <sup>3</sup> N/mm <sup>2</sup> ]	Vorbehandlung
A 030 A 031 A 032	39,7 42,4 41,5	Temperaturzyklen 20 - 70 - 20 °C  ohne Behinderung der Austrocknung
Mittelwert	41,2 ± 82,2 % +)	
B 030 B 031 B 032	38,6 38,5 39,7	
Mittelwert	38,9 ± 75,1 %	
A 078 A 079 A 081	23,2 25,0 23,3	Temperaturzyklen 20 - 200 - 20 °C
Mittelwert	23,8 ± 47,5 %	
B 078 B 079 B 081	21,6 21,5 22,8	
Mittelwert	22,0 ± 42,5 %	
A 025 A 026 A 027	20,9 19,6 19,9	Dauertemperatur 250 °C Standzeit 28 Tage
Mittelwert	20,1 ± 40,1 %	
B 025 B 026 B 027	20,1 19,8 18,7	
Mittelwert	19,5 ± 37,6 %	
A 028 A 029 A 033	17,6 17,5 22,1	Dauertemperatur 250 °C Standzeit 7 Tage
Mittelwert	19,1 ± 38,1 %	
B 028 B 029 B 033	18,7 20,5 20,4	
Mittelwert	19,9 ± 38,4 %	

+ ) Die Prozentzahlen beziehen sich auf die Ausgangs-E-Moduln gemäß Abschnitt 10.



### 13. Wärmedehnung an unversiegelten Probekörpern

- Probekörper: Zylinder 8/30 cm; 2 x 3 Stück (und 2 x 1 Stück für thermische Dehnung bis 750 °C)
- Lagerung: 90 Tage Wasserlagerung
- Vorbehandlung: Die Proben wurden dem Wasserlagerungsbecken entnommen, 1 h an der Luft getrocknet (oberflächentrocken) und in den Hochtemperaturprüfstand eingebaut. Anschließend wurden sie 3 mal be- und entlastet ( $P_{\max} \approx 30\%$  der Bruchlast). Die Messung der thermischen Dehnung erfolgte mit einer Unterlast von ca. 0,5 kN.
- Prüfung: Messung der thermischen Dehnung an jeweils 3 Probekörpern der Serie A und B bis 250 °C sowie jeweils an einem Probekörper der Serie A und B bis 750 °C. Die Aufheizgeschwindigkeit betrug 1,5 K/min (Betonoberflächentemperatur).

Die Ergebnisse sind in den folgenden Bildern 3 bis 6 dargestellt. Die ersten beiden Bilder zeigen die thermischen Dehnungen von jeweils 3 Probekörpern einer Serie, die bis 250 °C aufgeheizt wurden. Die Messungen erfolgten kontinuierlich. Aus Übersichtsgründen sind jedoch nur einzelne Meßpunkte in das Diagramm eingetragen.

Vergleicht man die Meßergebnisse der Serien A (Bild 3) und B (Bild 4) miteinander, so fällt die geringe Streuung in den Ergebnissen der jeweiligen Serie auf. Zum anderen stellt man einen erheblichen Unterschied in der thermischen Dehnung oberhalb von 150 °C fest. Bis 150 °C haben die beiden Kurven fast exakt die gleiche Steigung ( $\alpha_1 = 1,13 \cdot 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$  für Serie A und Serie B). Ab 150 °C verläuft dann jedoch die Dehnungskurve der Serie B erheblich flacher ( $\alpha_2 = 0,38 \cdot 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ ) als die der Serie A ( $\alpha_2 = 0,8 \cdot 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ ).

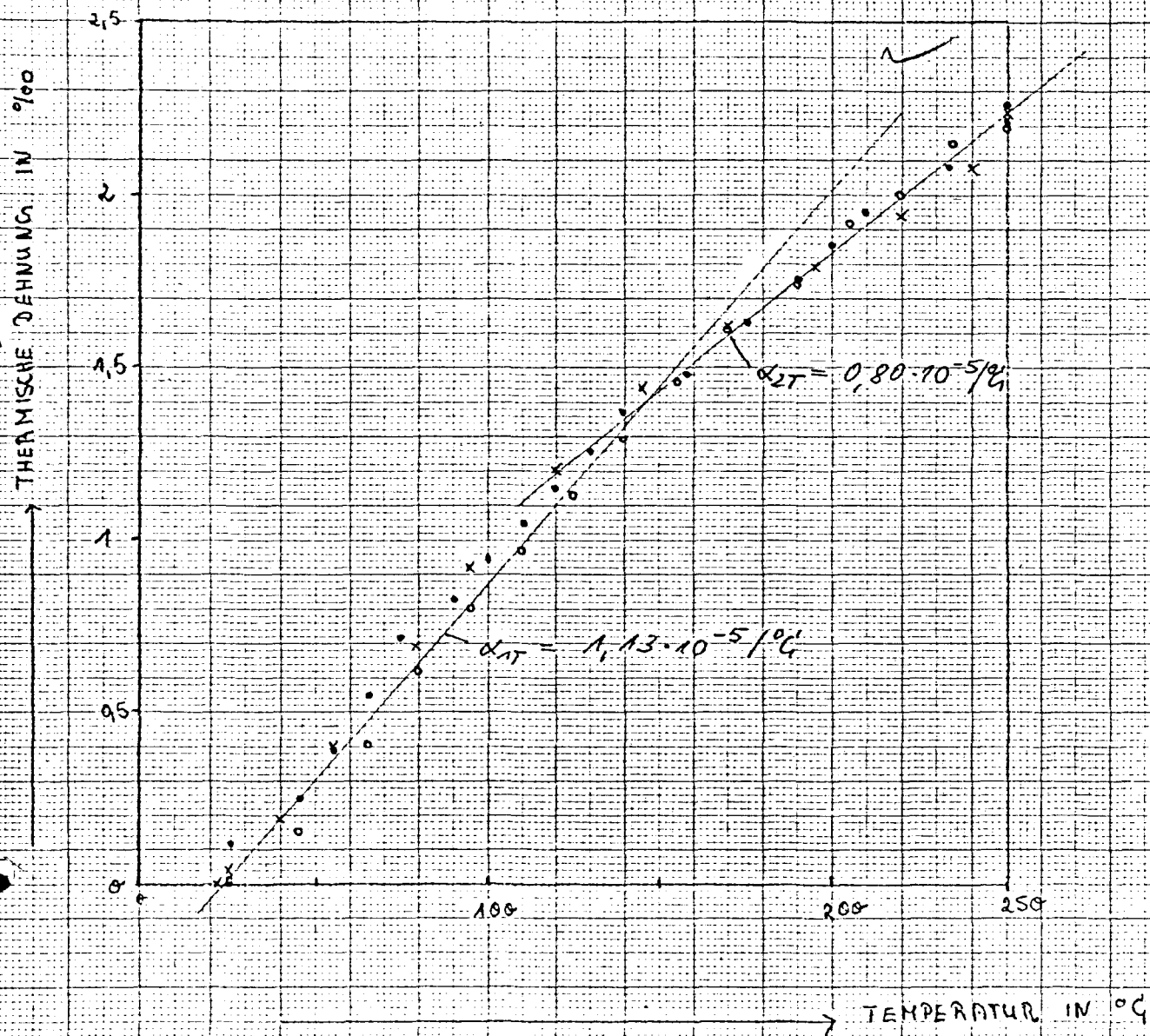
Hier macht sich offenbar der bei der Serie B gegenüber der Serie A geringere Gehalt an quarzitischen Grobzuschlägen bemerkbar (Serie A: Sand 0/2 mm = 30 %, quarzit. Kies 2/8 mm = 22 %, Basalt 8/22 mm = 48 %; Serie B: Sand 0/2 mm = 30 %, Basalt 8/22 mm = 70 %). Die mittlere lineare thermische Dehnung bis 500 °C beträgt beim quarzärmeren Beton (Serie B)  $\bar{\alpha} = 0,70 \cdot 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$  und beim quarzreicheren Beton (Serie A)  $\bar{\alpha} = 1,01 \cdot 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ .

Der Quarzsprung bei ca. 570 °C fällt beim quarzärmeren Beton (Serie B) deutlich geringer aus. Entsprechend erreichen die Maximalwerte der thermischen

Dehnung bei 750 °C recht unterschiedliche Werte, so beträgt die thermische Dehnung des quarzreicheren Betons (Serie A) ca. 10 % und die des quarzärmeren Betons (Serie B) ca. 6 % bei 750 °C.

Insgesamt ist die thermische Dehnung der beiden Betonserien gegenüber anderen Normalbetonen als günstig zu beurteilen. Dazu trägt vor allem die vergleichsweise geringere Ausdehnung des Basaltzuschlags bei.

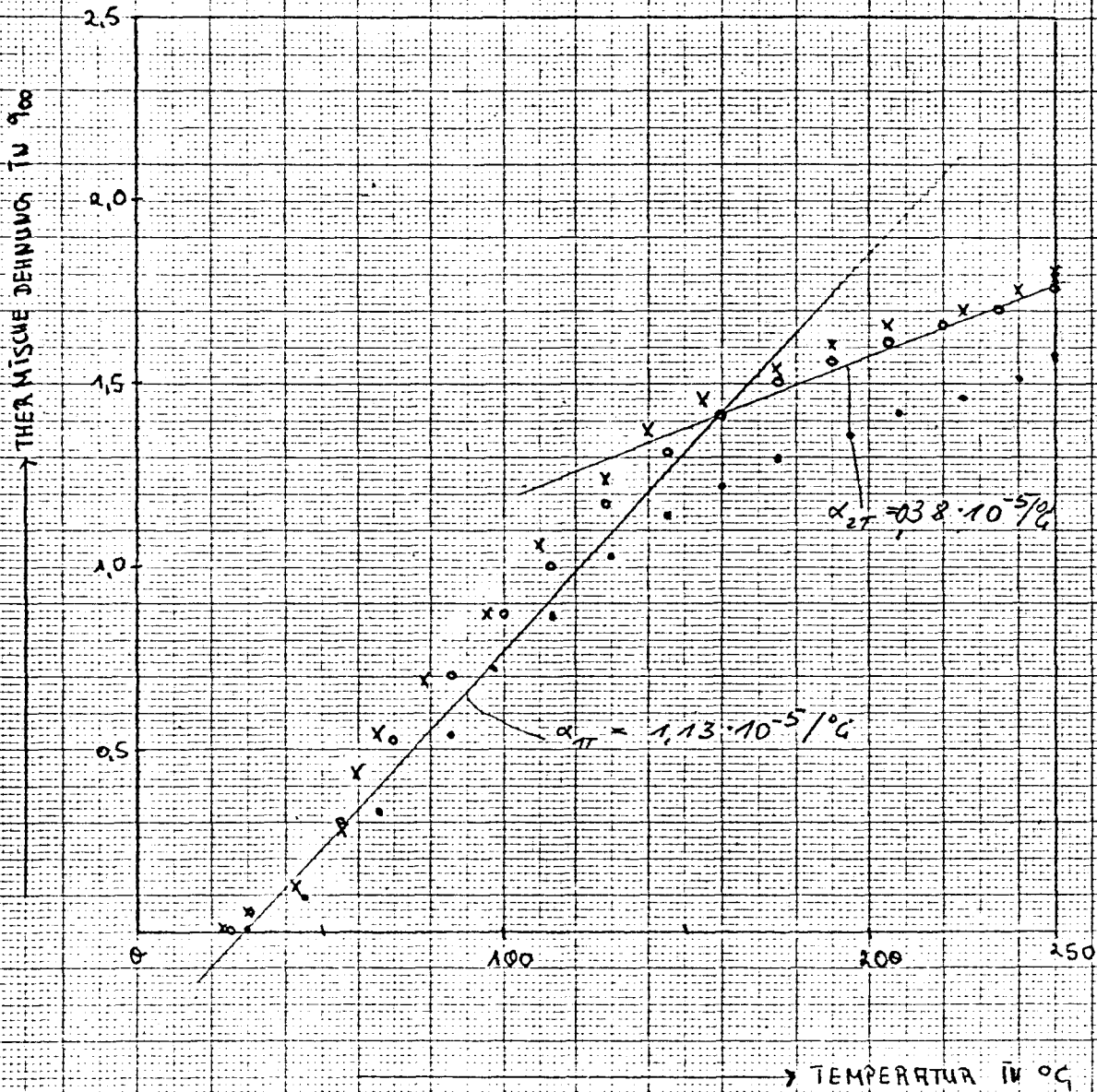
x HHT/A16 R 50°C  
 • HHT/A12 R 50°C  
 o HHT/A17 250°C



Thermische Dehnung des HHT-Betons - Serie HHTA

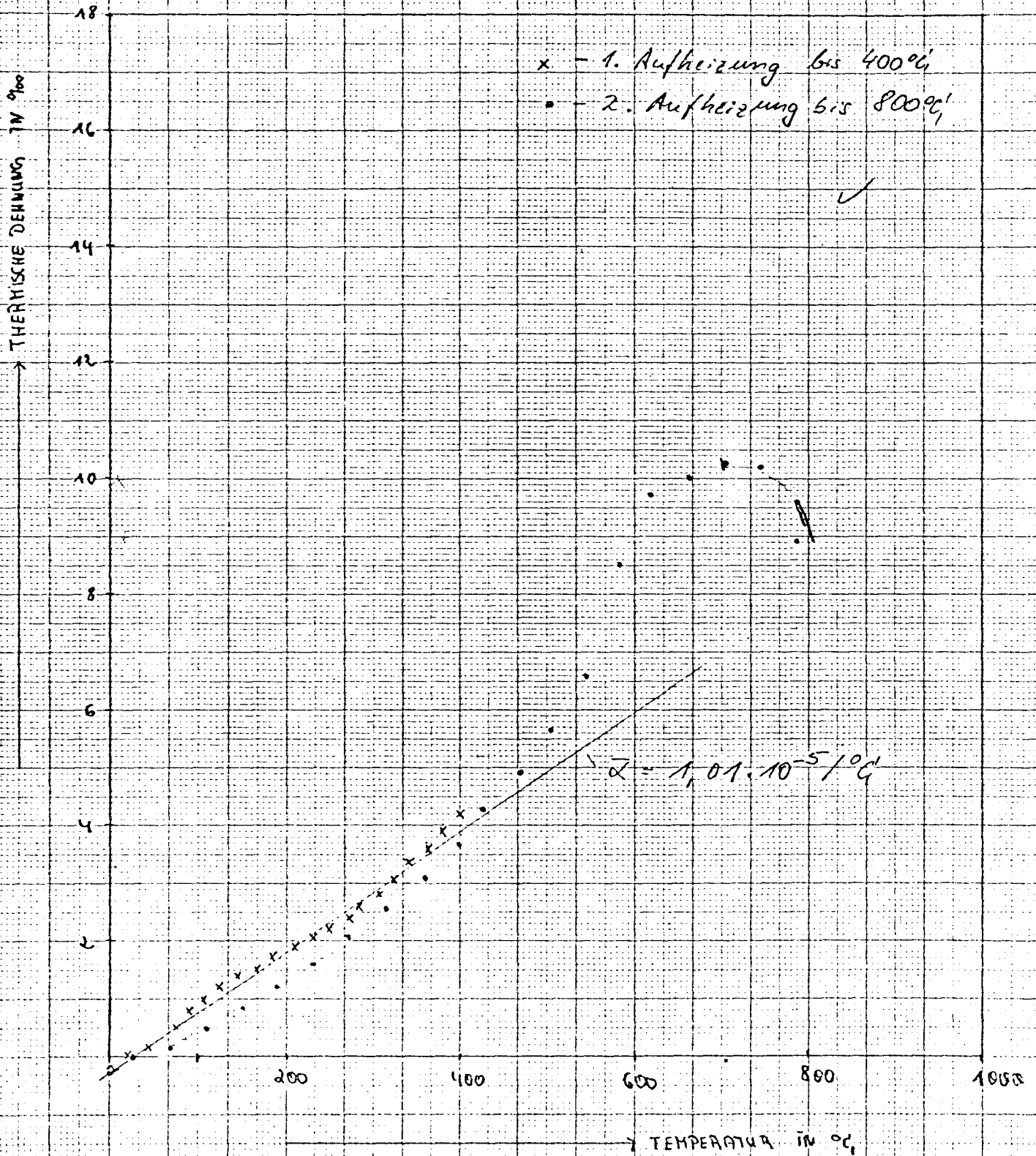
Bild 3: Thermische Dehnung unversiegelter Proben der Betonserie A

x HHT1B	051	250°C
• HHT1B	048	250°C
o HHT1B	044	250°C



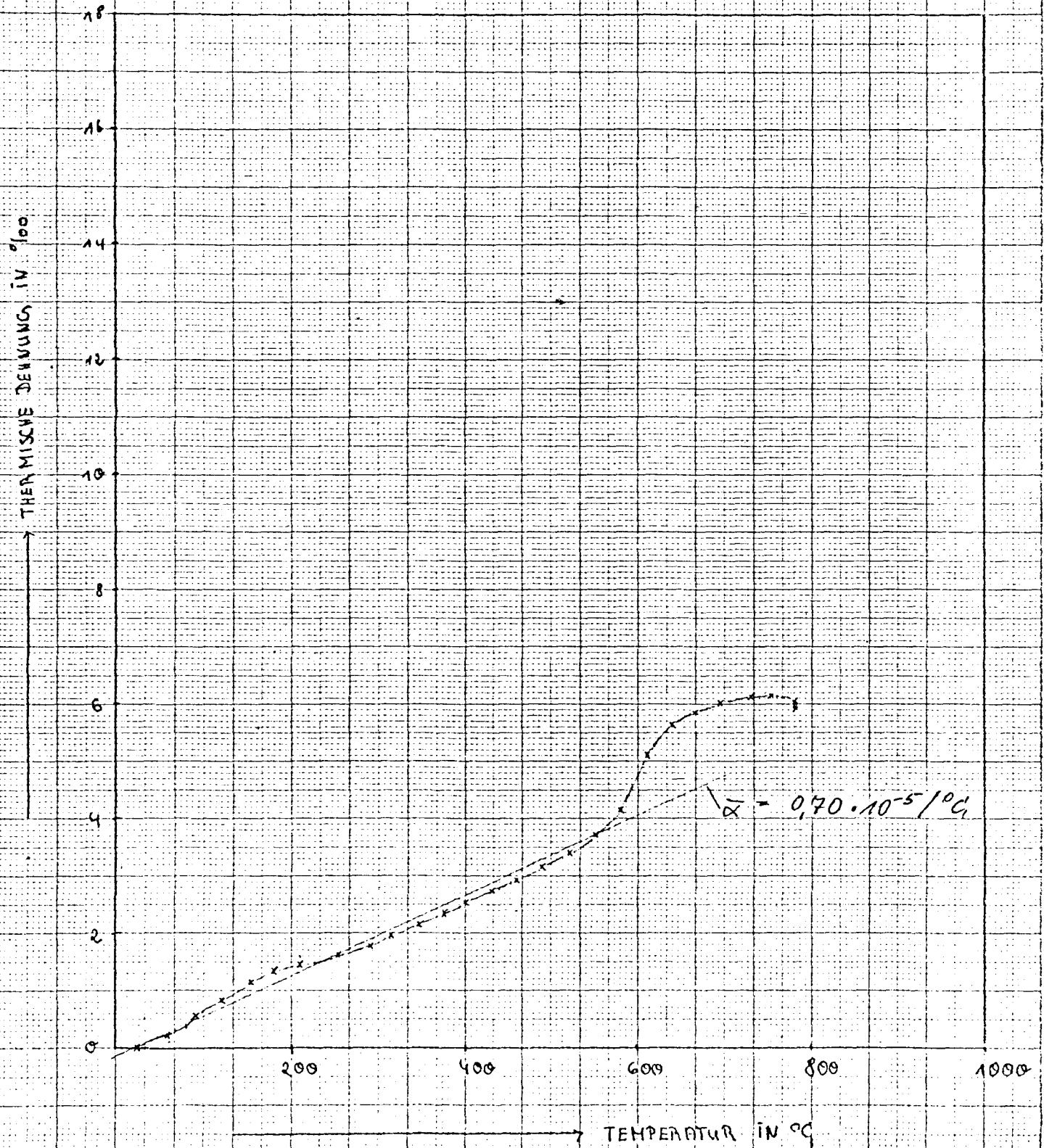
Thermische Dehnung des HHT-Betons - Serie HHTB

Bild 4: Thermische Dehnung unversiegelter Proben der Betonserie B



Thermische Dehnung des HHT-Belons - Serie A

Bild 5: Thermische Dehnung der Serie A bis 750 °C



Thermische Dehnung des HHT-Betons - Serie B

Bild 6: Thermische Dehnung der Serie B bis 750 °C

Zur Vergleichszwecken wurde auch die thermische Dehnung der beiden Betonserien an kleinen Proben mit dem Hochtemperaturdilatometer bestimmt.

Probekörper: Zylinder  $\varnothing$  19 mm,  $l = 40$  mm; 2 x 3 Stück (und 2 x 1 Stück bei 105 °C vorgetrocknete Proben)

Lagerung: Je 3 Zylinder bis zur Versuchsdurchführung unter Wasser, je 1 Zylinder kurz vor Versuchsdurchführung dem Wasser entnommen und bei ca. 105 °C vorgetrocknet.

Vorbehandlung: Im Alter von ca. 56 Tagen wurden Zylinder (15/30 cm) in 4 cm dicke Scheiben zersägt, aus denen anschließend Bohrkerne  $\varnothing$  19 mm ausgebohrt wurden. Die Zylinder bzw. die Bohrkerne lagerten bis zur Versuchsdurchführung im Alter von 90 Tagen unter Wasser. Kurz vor der Versuchsdurchführung wurden die Proben dem Wasserlagerungsbecken entnommen, mit einem Tuch abgetrocknet, gewogen und sofort ins Dilatometer eingebaut. Jeweils 1 Zylinder wurde vor dem Einbau ins Dilatometer ca. 1 Woche bis zur Gewichtskonstanz bei 105 °C getrocknet.

Prüfung: Die Messung der thermischen Dehnung erfolgte im Hochtemperaturdilatometer. Die Aufheizgeschwindigkeit betrug 5 K/min.

Die Bilder 7 und 8 zeigen die Ergebnisse der Messungen, wobei die durchgezogenen Linien jeweils Mittelwerte aus 3 Versuchen darstellen, während die gestrichelten Kurven die thermische Dehnung eines auf 105 °C vorgetrockneten Zylinders wiedergibt. Die Fehlerbalken sollen die Streubereiche der Dehnungen der drei wassergelagerten Proben andeuten.

Vergleicht man die Ergebnisse, die mit dem Hochtemperaturdilatometer erhalten wurden, mit den vorherigen Meßergebnissen, so bemerkt man, daß beide Versuchsmethoden fast exakt die gleichen Ergebnisse liefern, obwohl Probekörperdimensionen, Aufheizgeschwindigkeiten, Probenvorbereitung usw. erheblich voneinander abweichen. So wurde beispielsweise der mittlere thermische Ausdehnungskoeffizient im Temperaturbereich 20 °C bis 500 °C mit dem Hochtemperaturdilatometer zu  $1,05 \cdot 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$  (Serie A) bzw.  $0,75 \cdot 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$  (Serie B) und mit der Hochtemperaturprüfapparatur zu  $1,01 \cdot 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$  (Serie A) bzw.  $0,70 \cdot 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$  (Serie B) bestimmt. Auch in der maximalen thermischen Dehnung bei 750 °C lagen die Werte sehr eng beieinander (Serie A - Hochtemperaturdilatometer: 11 %, Hochtemperaturprüfstand 10 %; Serie B - Hochtemperaturdilatometer 6 %, Hochtemperaturprüfstand: 6,1 %). Im Hinblick auf die versuchsüblichen Streuungen kann man somit von "identischen" Ergebnissen sprechen.

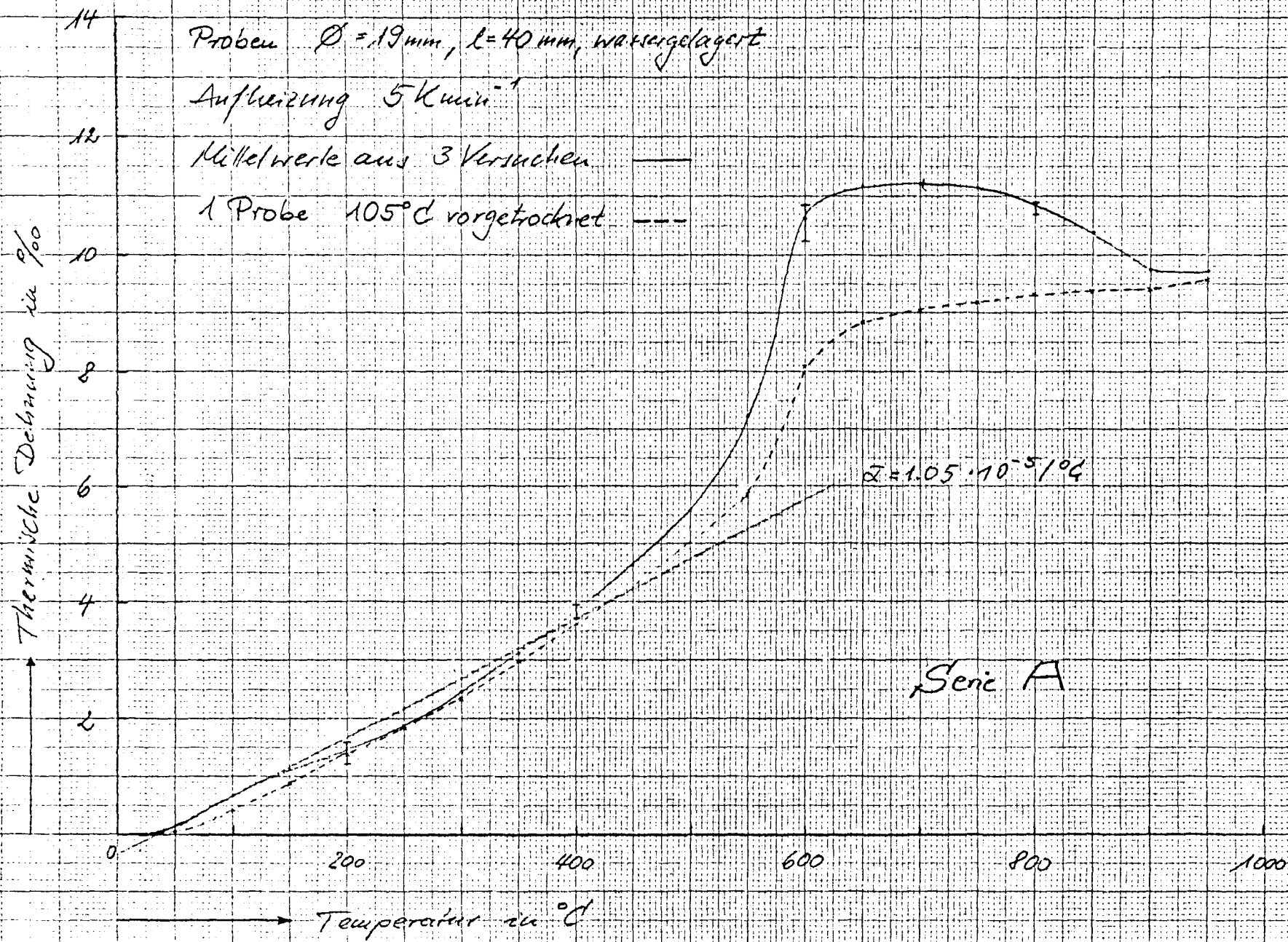


Bild 7: Thermische Dehnung des Betons der Serie A im Hochtemperaturdilatometer



# Thermische Dehnung des HHT-Betons

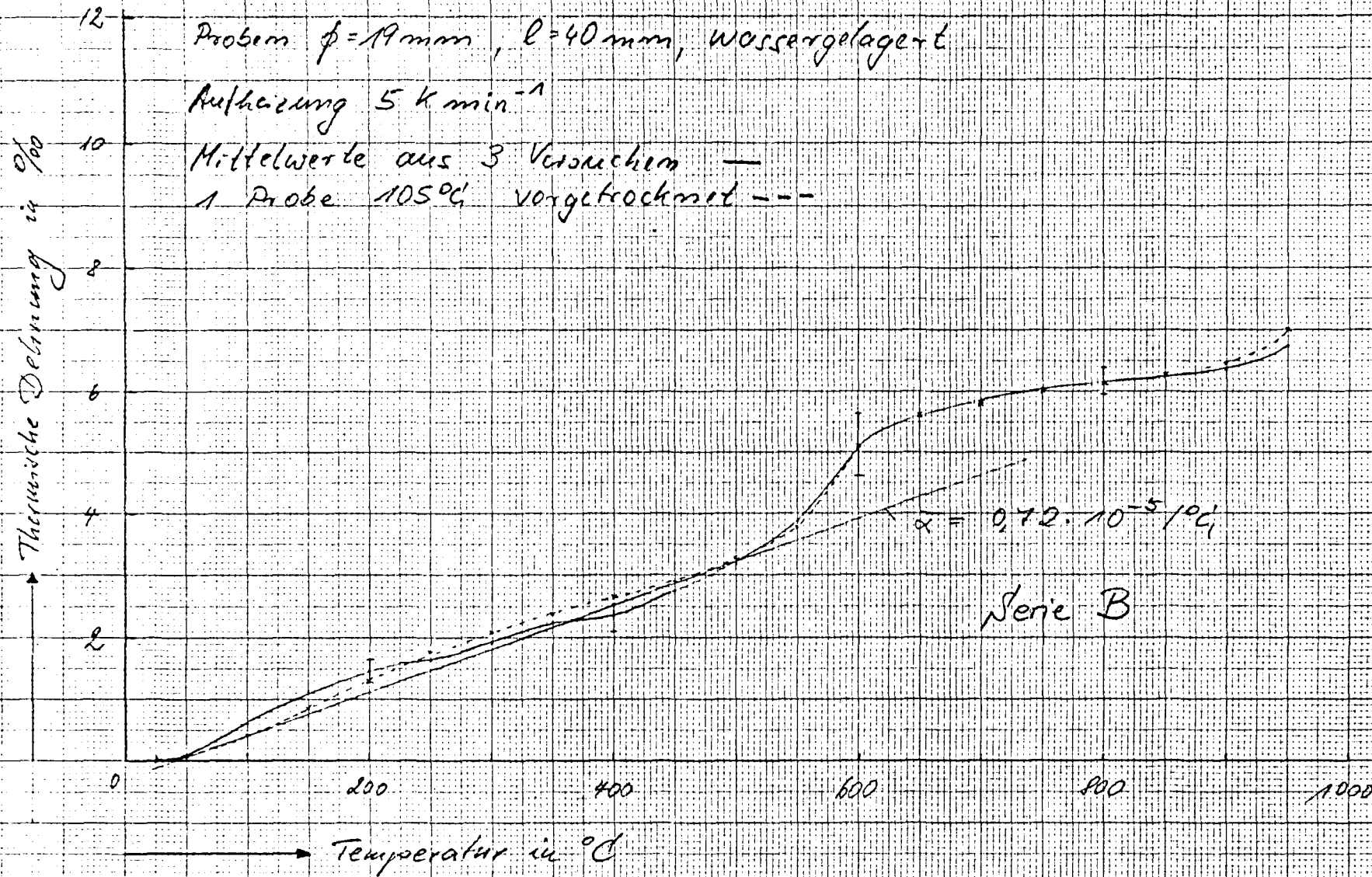


Bild 8: Thermische Dehnung des Betons der Serie B im Hochtemperaturdilatometer

Als Ergänzung der Versuche wurde in dem Hochtemperaturprüfstand die Wärme-  
dehnung eines Kalksteinbetons der Reaktorbau-Forschungs- und Baugesellschaft,  
Seibersdorf, bestimmt.

Probekörper: Zylinder 8/30 cm; 2 x 1 Stck.

Lagerung: 90 Tage Wasserlagerung

Vorbehandlung: Die Proben wurden nach der Anlieferung im Institut sofort aus-  
gepackt und bis zum Alter von 90 Tagen unter Wasser gelagert.  
Zur Versuchsdurchführung wurden sie dem Wasserlagerungsbecken  
entnommen, 1 h an der Luft getrocknet (oberflächentrocken) und  
in den Hochtemperaturprüfstand eingebaut. Anschließend wurden  
die Probekörper 3 mal be- und entlastet ( $P_{\max} \approx 30 \%$  der Bruch-  
last). Die Messung der thermischen Dehnung erfolgte mit einer  
Unterlast von 0,5 kN.

Prüfung: Die Messung der thermischen Dehnung erfolgte an jeweils  
1 Probekörper der Betonserie hk 17 und der Betonserie gj 37.  
Die Aufheizgeschwindigkeit betrug 1,5 K/min (Betonoberflächen-  
temperatur).

Bemerkung: Ursprünglich war vorgesehen, die thermische Dehnung der Sei-  
bersdorfer Betone gj und hk mit dem Hochtemperaturdilatometer  
zu bestimmen. Aus technischen Gründen war dies in dem ange-  
strebten Versuchszeitraum nicht möglich. Da nach den vorlie-  
genden Erfahrungen das Hochtemperaturdilatometer und der Hoch-  
temperaturprüfstand gleiche Ergebnisse liefern, wurden die  
Versuche auf dem Hochtemperaturprüfstand durchgeführt.

Die Bilder 9 und 10 zeigen die thermischen Dehnungen der beiden Seibersdorfer  
Kalksteinbetone (Serie hk bzw. gj).

Der Koeffizient der linearen thermischen Dehnung beträgt im Temperaturinter-  
vall  $20^{\circ}\text{C}$  bis  $400^{\circ}\text{C}$  für beide Betone  $0,92 \cdot 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ . Auch in den absolu-  
ten Werten der thermischen Dehnung unterschieden sich die beiden Betone kaum.  
So beträgt beispielsweise die thermische Dehnung bei  $750^{\circ}\text{C}$  10,25 % bei der  
Serie hk und 10,1 % bei der Serie gj. Der größte Unterschied der beiden ther-

mischen Dehnungen liegt im Bereich um 500 °C. Er beträgt ca. 0,4 % und bewegt sich damit im Rahmen üblicher Exemplarstreuungen.

Im Vergleich zu den untersuchten Betonen nimmt der Seibersdorfer Beton eine Mittelstellung ein. Einen wesentlich geringeren mittleren linearen Ausdehnungskoeffizienten (bis ca. 400 °C) besitzt der vorliegende Basaltbeton der Serie B mit  $\bar{\alpha} = 0,70 \cdot 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$  und der Lausanner Beton (vgl. Anhang III) mit  $\bar{\alpha} = 0,61 \cdot 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ , während der quarzreichere Basaltbeton der Serie A zusammen mit den beiden Seibersdorfer Serien ein  $\bar{\alpha}$  von ungefähr  $1 \cdot 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$  aufweist. Hinsichtlich der maximalen Dehnung bei 750 °C nehmen die Seibersdorfer Betonserien ebenfalls eine Mittelstellung ein und liegen zusammen mit dem Braunschweiger Beton (Serie A) und dem Lausanner Beton (vgl. Anhang III) bei ca. 10 %.

Wesentlich günstiger liegt nur der quarzarme Braunschweiger Beton (Serie B) mit ca. 6 % bei 750 °C. Die Karlsruher HHT-Betone wiesen mit ca. 13 % die relativ höchsten thermischen Dehnungen bei 750 °C auf.

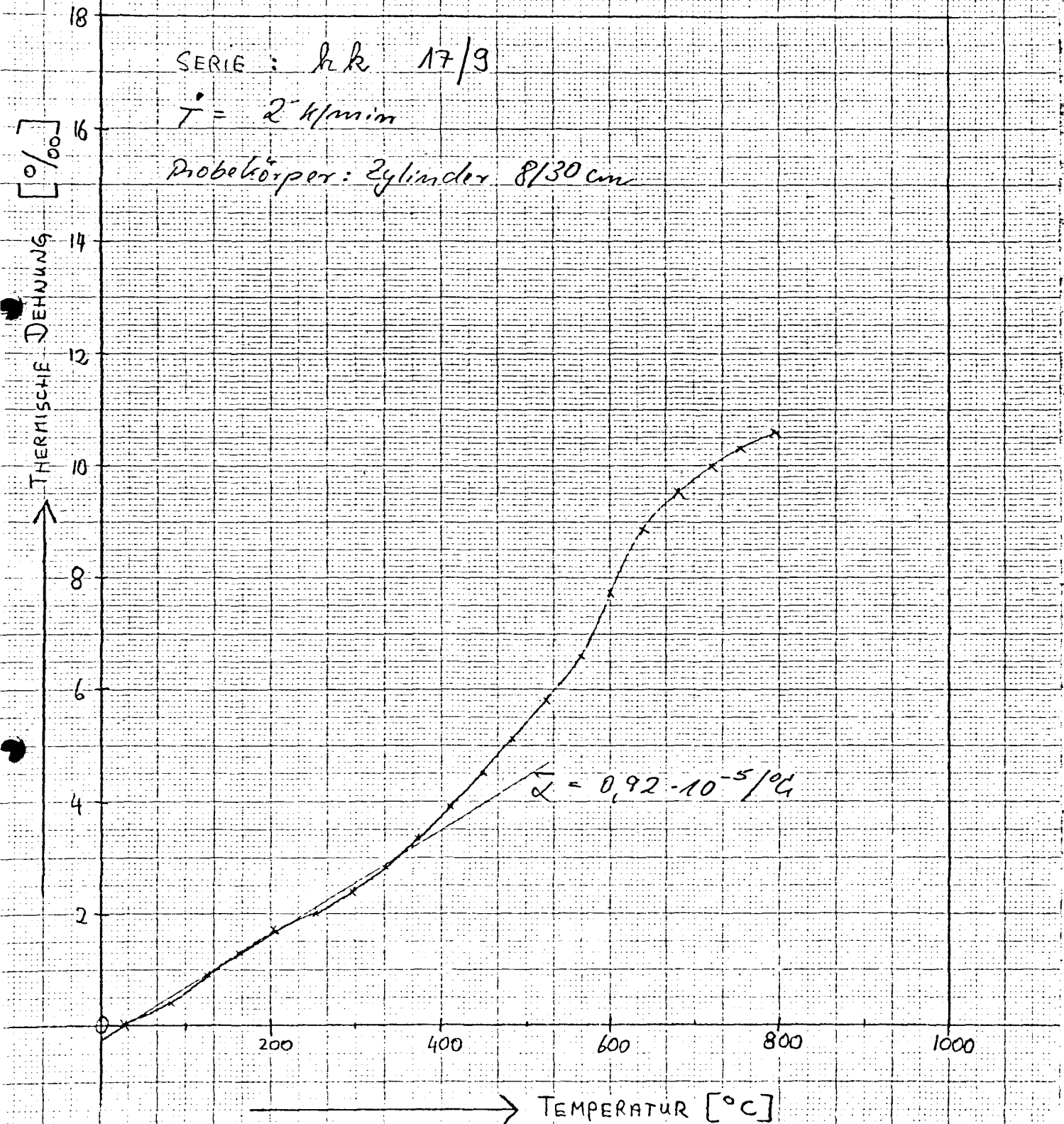


Bild 9: Thermische Dehnung des Seibersdorfer Betons hk -  
gemessen im Hochtemperaturprüfstand

SERIE : gj 37/5

$\dot{T} = 2 \text{ K/min}$

Probekörper: Zylinder 8/30 cm

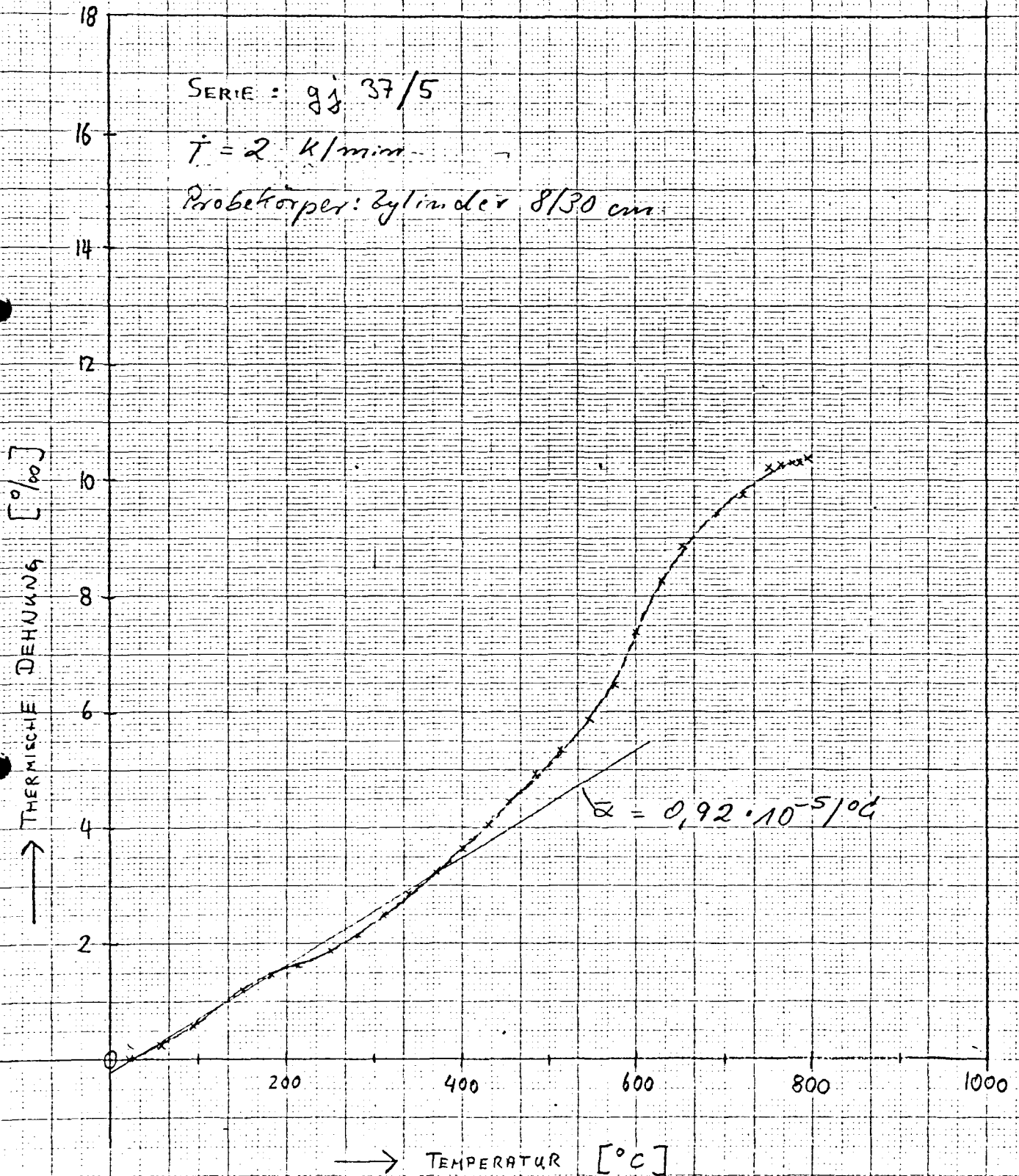


Bild 10: Thermische Dehnung des Seibersdorfer Betons gj -  
gemessen im Hochtemperaturprüfstand

#### 14. Zwängungsversuche

Probekörper: Zylinder 8/30 cm; 2 x 3 Stück = 6 Versuche

Lagerung: 90 Tage Wasserlagerung

Vorbehandlung: Die Proben wurden dem Wasserlagerungsbecken entnommen, mit Tüchern abgetrocknet und nach ca. 1 h Lagerung an Luft der vorgegebenen thermomechanischen Belastung unterzogen. Jeweils eine Probe wurde jedoch vorher ca. 1 Woche bis zur Gewichtskonstanz bei 105 °C vorgetrocknet.

Prüfung: Die Probekörper wurden in die Prüfmaschine eingebaut, 3 mal be- und entlastet (Höchstlast  $\approx 30\%$  der Bruchlast) und anschließend der angegebenen thermomechanischen Belastung unterzogen. Dabei sind 3 Belastungsfälle zu unterscheiden:

- a) Zwängung - wassergelagert,
- b) Zwängung - total,
- c) Zwängung - 105 °C - vorgetrocknet.

Während sich die Fälle a und c nur in der Vorbehandlung der Probekörper unterscheiden (a: bis zur Prüfung wassergelagert; c: 90 Tage Wasserlagerung, anschließend ca. 1 Woche Vortrocknung bei 105 °C), wurde im Fall b die Dehnungsbehinderung in der zweiten Aufheizphase von Beginn des Temperaturanstiegs an aufrechterhalten und nicht wie in den Fällen a und c erst nach Erreichen der Ausgangsdehnung bei Erstbelastung. Im Fall b waren alle Proben bis kurz vor Versuchsbeginn wassergelagert.

#### Erläuterung:

Die Ergebnisse der Zwängungsversuche sind in den nachfolgenden Bildern dargestellt. Jedes Bild enthält über der Zeitachse, auf der die Versuchsdauer in Stunden angegeben ist, oben den Temperaturverlauf in °C, darunter den Dehnungsverlauf in % und unten den Spannungsverlauf in N/mm<sup>2</sup>. Wie man dem jeweiligen Bild entnehmen kann, wurden die Proben nach dem Einbau in den Versuchsstand (und nach dem dreimaligen zyklischen Vorbelasten bzw. ca. 30 % der Bruchlast) entsprechend der Aufgabenstellung mit 26 N/mm<sup>2</sup> belastet. Anschließend wurde  $\epsilon_0$  mit Hilfe der servohydraulischen Regeleinheit auf dem entsprechenden Wert konstant gehalten, d. h. während des Aufheizens (mit 1,5 K/min) wurde die Belastung verändert und gemessen.

### Zwängungen wassergelagerter Proben:

Während des Aufheizens steigt aufgrund des Ausdehnungsbestrebens des Betons zunächst die Spannung mit der Temperatur. Schon nach einer relativ geringen Temperaturerhöhung (im vorliegenden Fall bei ca. 70 °C) nimmt der Spannungsanstieg ab. Ab ca. 80 °C ist kein Spannungsanstieg mehr zu verzeichnen, sondern mit weiter ansteigender Temperatur sinkt die Spannung allmählich ab. Oberhalb 120 °C treten Werte unterhalb der Ausgangsspannung auf. Der Spannungsabfall verstärkt sich noch, wenn nach dem Erreichen der Höchsttemperatur die Temperatur wieder abgesenkt wird. Bei ca. 140 °C im Abkühlungsast ist die Spannung auf 2,5 N/mm<sup>2</sup> gesunken. Bei dieser Spannung wurde von der Verformungsregelung auf die Kraftregelung umgeschaltet, da bei weiterer Abkühlung Zugspannungen aufgebracht werden müßten, um die Ausgangsverformung aufrecht erhalten zu können. Statt dessen wurden durch Anlegen der kleinen Unterspannung von 2,5 N/mm<sup>2</sup> die durch die Zwängungen und das Aufheizen entstandenen bleibenden Stauchungen ermittelt. Sie betrugen im vorliegenden Fall (Probe A/3) nach Abkühlen des Probekörpers auf 24 °C 1,76 % (s. Bild 11).

Beim erneuten Aufheizen wurde die Probe weiterhin mit 2,5 N/mm<sup>2</sup> belastet, bis bei 160 °C die Ausgangsdehnung  $\epsilon_0$  erreicht wurde. Das dazugehörige  $\alpha_T = 0,94 \cdot 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$  stimmt sehr gut mit dem für die vorgetrockneten bzw. zweimal aufgeheizten Proben im Hochtemperaturdilatometer und Hochtemperaturprüfstand ermittelten Wert von  $\alpha_T = 0,93 \cdot 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$  überein. Nach dem Erreichen der Ausgangsdehnung  $\epsilon_0$  wurde von der Kraft- in die Dehnungsregelung umgeschaltet und der Kraftanstieg infolge der behinderten Ausdehnung gemessen. Die Zwängungsspannung, die nun bei der Höchsttemperatur von 200 °C auftrat, lag mit 13 N/mm<sup>2</sup> 50 % unterhalb der angenommenen Gebrauchsspannung. Rechnet man mit dem oben ermittelten  $\alpha_T = 0,95 \cdot 10^{-5}$  und einem E-Modul von 25,7 kN/mm<sup>2</sup> (gemäß Abschnitt 11, der dort bei 250 °C im heißen Zustand ermittelt wurde), so erhält man eine Maximalspannung von

$$\begin{aligned}\underline{\underline{\sigma_{\max}}} &= \sigma_0 + \epsilon_T \cdot E = \sigma_0 + \alpha_T \cdot \Delta T \cdot E = 2,5 \text{ N/mm}^2 + 0,94 \cdot 10^{-5} \cdot 40 \text{ }^{\circ}\text{C} \\ &\quad \cdot 25,7 \text{ kN/mm}^2 \\ &= 2,5 \text{ N/mm}^2 + 0,94 \cdot 10^{-5}/^{\circ}\text{C} \cdot 40 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot 25,7 \text{ kN/mm}^2 \\ &= 2,5 \text{ N/mm}^2 + 9,66 \text{ N/mm}^2 = \underline{\underline{12,2 \text{ N/mm}^2}}\end{aligned}$$

ein Wert, der dem Vergleich mit der Messung durchaus standhält.

Kühlt man die Probe von der Höchsttemperatur wieder ab, so verhält sie sich wiederum nahezu "elastisch", das soll heißen, daß das thermomechanische Verhalten im wesentlichen durch die elastische Verformung und den linearen ther-

mischen Ausdehnungskoeffizienten beschrieben werden kann. Bei weiteren zyklischen thermomechanischen Belastungen verändert sich das Verhalten der Probe nur äußerst geringfügig, wie die Ergebnisse des dritten Temperaturzyklus zeigen (vgl. auch die Werte der Anhänge I und II nach mehreren Temperaturzyklen).

Bei erstmaliger Temperatureinwirkung tritt eine Vielzahl von Phänomenen auf, von denen hier nur das Schwinden, das Verdunsten bzw. Verdampfen von Wasser, die Rißbildung infolge globaler Temperaturspannungen, die Rißbildung als Folge von Inkompatibilitäten zwischen Zuschlag und Zementstein und die Gelzersetzung genannt seien. Die damit verbundenen Effekte sind reversibel oder auch irreversibel. Sie sind darüber hinaus vom Ausgangszustand (dazu gehört beispielsweise die Vorlagerung) der Proben abhängig und beeinflussen wesentlich das Verformungsverhalten von Beton.

Zur Beschreibung des Verformungsverhaltens bei instationären Temperaturbeanspruchungen wurde in einem anderen Zusammenhang eine phänomenologische Theorie entwickelt, die es gestattet, durch Einführung temperaturabhängiger Stoffkonstanten und Kriechfunktionen Betonverformungen analytisch zu beschreiben. Die Grundgleichung lautet:

$$\epsilon = \frac{\sigma(\vartheta)}{E(\vartheta)} (1 + \varphi(\vartheta)).$$

Betrachtet man die Spannungen, die bei 100 °C zu erwarten sind, muß man im vorliegenden Fall (Betonserie A) folgende Stoffwerte annehmen:

$$\sigma_0 = 26 \text{ N/mm}^2; \alpha_T = 0,94 \cdot 10^{-5}/^{\circ}\text{C};$$

$$E(20^{\circ}\text{C}) = 50,1 \text{ kN/mm}^2; E(100^{\circ}\text{C}) = 38,3 \text{ kN/mm}^2, \text{ angenommen};$$

$$\Delta T = 80^{\circ}\text{C}; \varphi = 0,5, \text{ angenommen (nach Schneider für Normalbeton, quarzitischer Zuschlag)}.$$

Ferner muß man berücksichtigen, daß die Spannung bei der vorliegenden Dehnungsbehinderung aus der Ausgangsdehnung  $\epsilon_0$  und der thermischen Dehnung  $\epsilon_{th}$  resultiert.

$$\epsilon = \epsilon_0 + \epsilon_{th}$$

Löst man die Grundgleichung nach  $\sigma$  auf, so ergibt sich



$$\begin{aligned}\sigma(\vartheta) &= \frac{\varepsilon_o + \varepsilon_{th}}{1 + \varphi} \cdot E(100^\circ\text{C}) \\ &= \frac{0,52 + 0,75}{1,5} \cdot 38,3 \text{ N/mm}^2 = \underline{\underline{32,4 \text{ N/mm}^2}}\end{aligned}$$

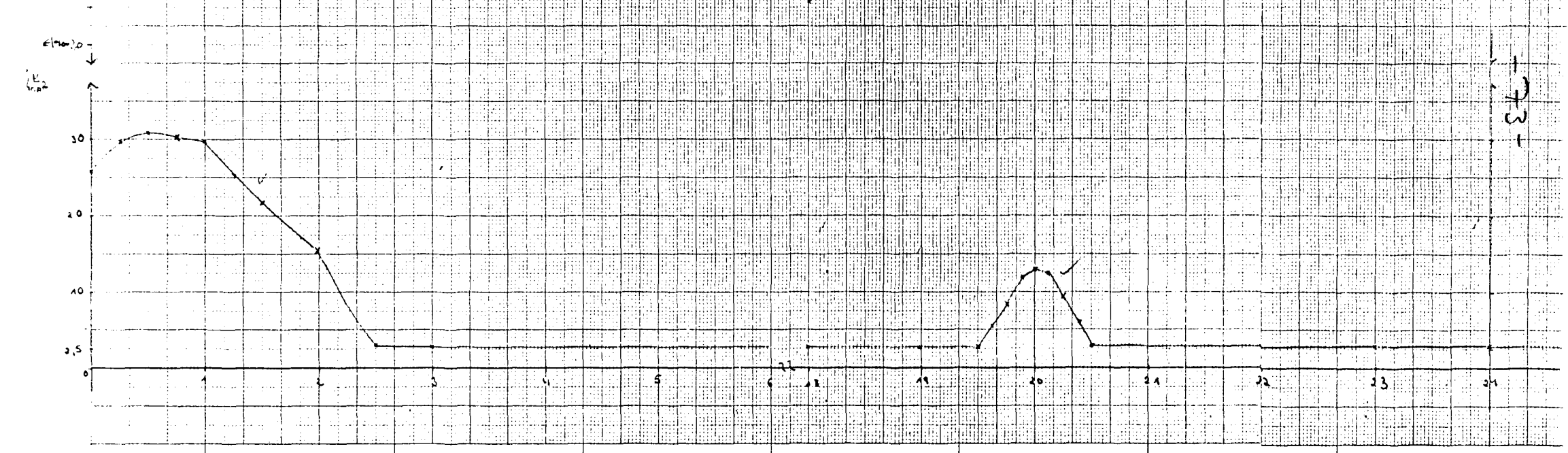
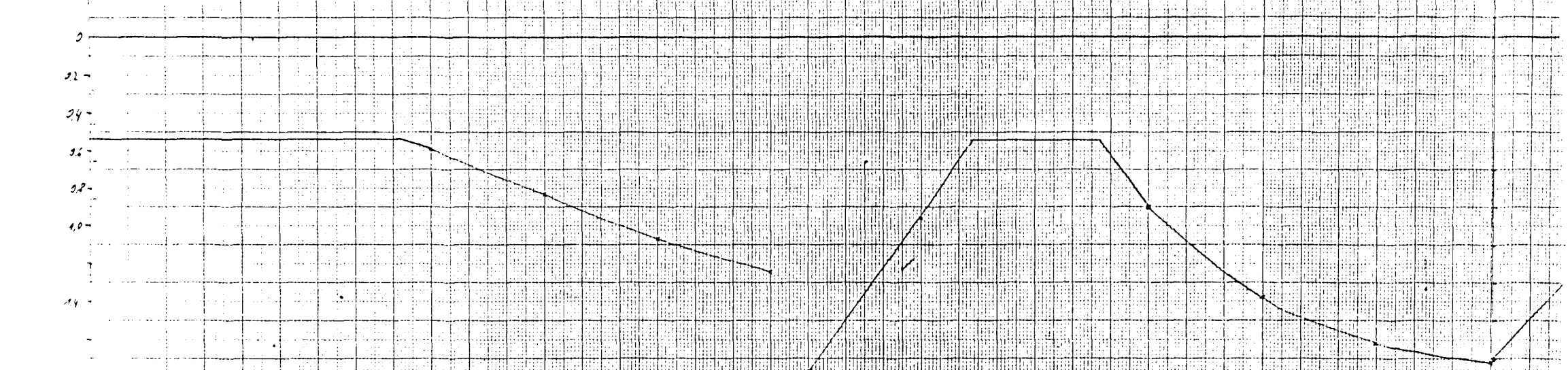
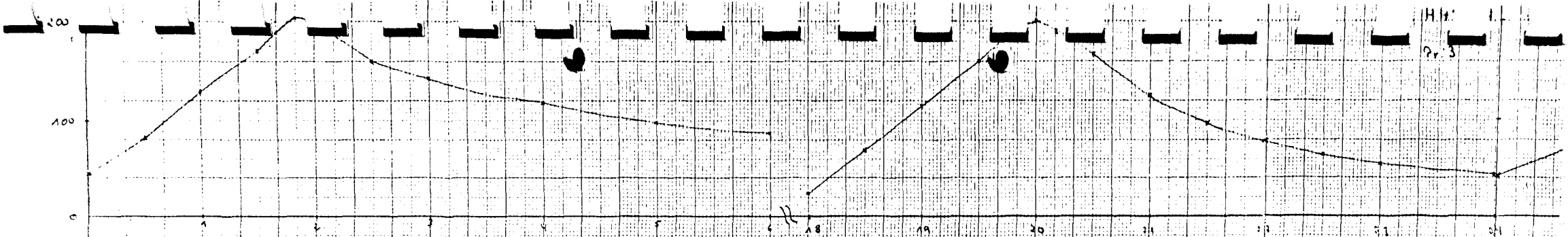
Gemessen wurden dagegen  $30,5 \text{ N/mm}^2$ . Bei  $200^\circ\text{C}$  erhält man unter Annahme von  $E(200^\circ\text{C}) = 25,7 \text{ kN/mm}^2$  und  $\varphi = 1,2$  eine Zwängungsspannung von  $21,9 \text{ N/mm}^2$ . Dieser Spannung steht ein Meßwert von  $17,5 \text{ N/mm}^2$  gegenüber. Die beiden Überschlagsrechnungen zeigen, daß aufgrund der irreversiblen Kriech- und Schwindphänomene, die besonders stark bei wassergelagerten Proben auftreten, ein erheblicher Anteil der Zwängungsspannungen abgebaut wird.

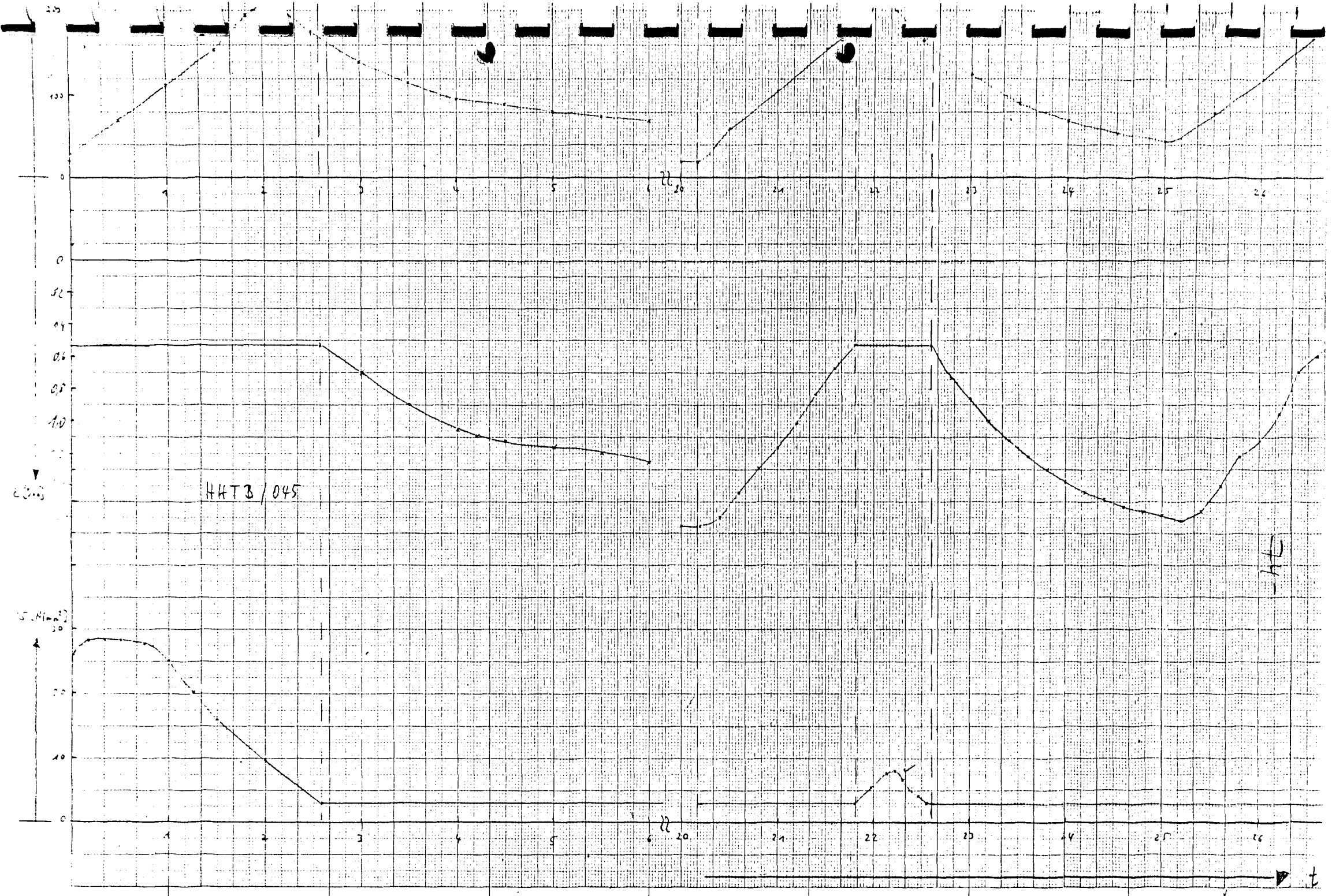
Würde man bei der Berechnung der Zwängungsspannungen nur die thermische Dehnung und die Änderung des E-Moduls berücksichtigen, erhielte man Spannungen von  $51,4 \text{ N/mm}^2$  ( $100^\circ\text{C}$ ) bzw.  $59,4 \text{ N/mm}^2$  ( $200^\circ\text{C}$ ); Werte, die nicht mit den Messungen übereinstimmen. Bei dem zweiten, dritten und allen weiteren Aufheizungen treten diese Schwind- und Kriechphänomene dann offenbar nicht mehr auf, wie oben anhand der "elastischen" Rechnung gezeigt werden konnte.

Bei dem quarzärmeren Beton der Serie B (s. Bild 12) steigt die Zwängungsspannung während der ersten Aufheizung kaum über die eingeprägte Ausgangsspannung von  $26 \text{ N/mm}^2$  an, was unter anderem auf die geringere thermische Dehnung dieser Serie gegenüber dem quarzreicheren Beton (Serie A) zurückzuführen ist. Aus der zweiten Aufheizung kann man beispielsweise ein  $\alpha_T = 0,70 \cdot 10^{-5}/^\circ\text{C}$  entnehmen; ein Wert, der nahezu exakt mit den Werten aus Abschnitt 13 ( $\alpha_T = 0,70 \cdot 10^{-5}/^\circ\text{C}$ ) übereinstimmt. Setzt man diese Werte sowie

$$\begin{aligned}E_{20} &= 51,8 \text{ kN/mm}^2; E(100^\circ\text{C}) = 39,6 \text{ kN/mm}^2, (\text{angenommen}); \\ E(200^\circ\text{C}) &= 23,5 \text{ kN/mm}^2, (\text{angenommen}); \text{ nach Abschnitt 11, bei } 250^\circ\text{C}; \\ \varphi(100^\circ\text{C}) &= 0,5 (\text{angenommen, nach Schneider}), \varphi(200^\circ\text{C}) = 1,2 \\ &\quad (\text{angenommen, nach Schneider})\end{aligned}$$

in die obige Kriechformel ein, ergeben sich Zwängungsspannungen von  $28,8 \text{ N/mm}^2$  ( $100^\circ\text{C}$ ) und  $19,1 \text{ N/mm}^2$  ( $200^\circ\text{C}$ ), denen Meßwerte von  $27,5 \text{ N/mm}^2$  ( $100^\circ\text{C}$ ) sowie  $11,0 \text{ N/mm}^2$  ( $200^\circ\text{C}$ ) gegenüberstehen, d. h. auch hier werden die Zwängungsspannungen durch Schwinden und Kriechen wesentlich herabgemindert.





Bei der zweiten und allen weiteren Aufheizungen spielen Kriechphänomene keine Rolle mehr. Die Zwängungsspannungen lassen sich rein "elastisch" gemäß

$$\begin{aligned}\underline{\underline{\sigma_{\max}}} &= \sigma_o + \epsilon_T \cdot E = \sigma_o + \alpha_T \cdot \Delta T \cdot E \quad (200^\circ\text{C}) \\ &= (2,5 + 0,7 \cdot 10^{-5}/^\circ\text{C} \cdot 26^\circ\text{C} \cdot 23,5) \text{ N/mm}^2 = \underline{\underline{6,8 \text{ N/mm}^2}}\end{aligned}$$

berechnen. Das Ergebnis stimmt recht gut mit dem gemessenen Wert von  $8,0 \text{ N/mm}^2$  überein. Bei der dritten Aufheizung liegt die maximale Zwängungsspannung nur gering darunter - sie beträgt  $6,5 \text{ N/mm}^2$ .

Als bleibende Stauchung nach dem ersten Aufheizen wurden hier  $1,66 \%$  ermittelt; ein Wert, der nur geringfügig unter dem Wert des quarzreicheren Betons ( $1,76 \%$ ) liegt.

#### Zwängung - total

Die Versuchsdurchführung unterscheidet sich hierbei gegenüber der vorhergehend beschriebenen dadurch, daß die Dehnungsbehinderung in der zweiten Aufheizphase vor Beginn des Temperaturanstiegs an aufrecht erhalten wird und nicht erst nach Erreichen der Anfangsverformung  $\epsilon_o$  bei der Erstbelastung. Beim erstmaligen Aufheizen stimmen die maximalen Zwängungsspannungen sowie die bleibenden Dehnungen fast genau mit den vorhergehenden Meßwerten überein, die geringen Unterschiede sind dagegen auf Exemplarstreuungen zurückzuführen (s. Bild 13 und 14).

Bei der zweiten Aufheizung treten dagegen sowohl bei der Serie A als auch bei der Serie B erheblich höhere Zwängungsspannungen auf, die bei beiden Serien sogar die Maximalspannungen des ersten Heizzyklus übersteigen. Nimmt man an, daß bei der zweiten Aufheizung im unteren Temperaturbereich bis ca.  $150^\circ\text{C}$  kein Kriechen bzw. Schwinden mehr auftritt, so müßten sich entsprechend dem "elastischen" Ansatz aus dem vorigen Kapitel die Zwängungsspannungen ermitteln lassen.

Für die Serie A mit

$$\alpha_T = 0,94 \cdot 10^{-5}/^\circ\text{C}, E(100^\circ\text{C}) = 38,0 \text{ kN/mm}^2 \text{ und } E(200^\circ\text{C}) = 38,0 \text{ kN/mm}^2$$

(angesetzt wurde hier der E-Modul, der nach Abschluß der Zwängungsuntersuchungen am gleichen Probekörper im Kalten ermittelt wurde)

ergibt sich damit für  $100^\circ\text{C}$ :

$$\sigma_{\max} = \sigma_0 + \alpha_T \cdot \Delta T \cdot E \text{ (100 } ^\circ\text{C)}$$

$$\sigma(100^\circ\text{C}) = \{2,6 + 0,94 \cdot 10^{-5}/^\circ\text{C} \cdot 60^\circ\text{C} \cdot 38,0\} \text{ N/mm}^2 = 24,0 \text{ N/mm}^2$$

Gemessen wurde demgegenüber: 22,5 N/mm<sup>2</sup>.

Für 150 °C ergibt sich:

$$\sigma_{\max} = \{\sigma_0 + 0,94 \cdot 10^{-5}/^\circ\text{C} \cdot 110^\circ\text{C} \cdot 38,0\} \text{ N/mm}^2 = 41,9 \text{ N/mm}^2$$

Gemessen wurde dagegen: 37,5 N/mm<sup>2</sup>.

Das heißt, daß sich das Verformungsverhalten des Betons unter diesen Bedingungen bis 150 °C ungefähr mit einem elastischen Ansatz beschreiben läßt. Oberhalb von 150 °C zeigt sich deutlich ein Abflachen des Anstiegs der Zwängungsspannungen, obwohl die Temperatur weiterhin linear ansteigt. Dies ist auch verständlich, da ab 40 N/mm<sup>2</sup> schon erhebliche plastische Verformungen einsetzen, denn diese Spannungen liegen schon sehr nahe an den Bruchspannungen (an dem gleichen Probekörper wurde nach dem Zwängungsversuch ein  $\sigma$ - $\epsilon$ -Diagramm aufgenommen; hierbei wurden eine Bruchspannung von 58,3 N/mm<sup>2</sup> und ein E-Modul von 38,0 kN/mm<sup>2</sup> gemessen). Aus solchen plastischen Verformungen resultieren auch größtenteils die nach der zweiten Aufheizung bleibenden Verformungen von ca. 0,75 %.

Für die Serie B läßt sich die gleiche Abschätzung durchführen. Mit

$$\alpha_T = 0,7 \cdot 10^{-5}/^\circ\text{C}, E(100^\circ\text{C}) = 33,1 \text{ kN/mm}^2 \text{ und } E(200^\circ\text{C}) = 33,1 \text{ kN/mm}^2$$

(angesetzt wurde hier der im kalten Zustand am gleichen Probekörper nach Abschluß der Zwängungsuntersuchungen gemessene E-Modul)

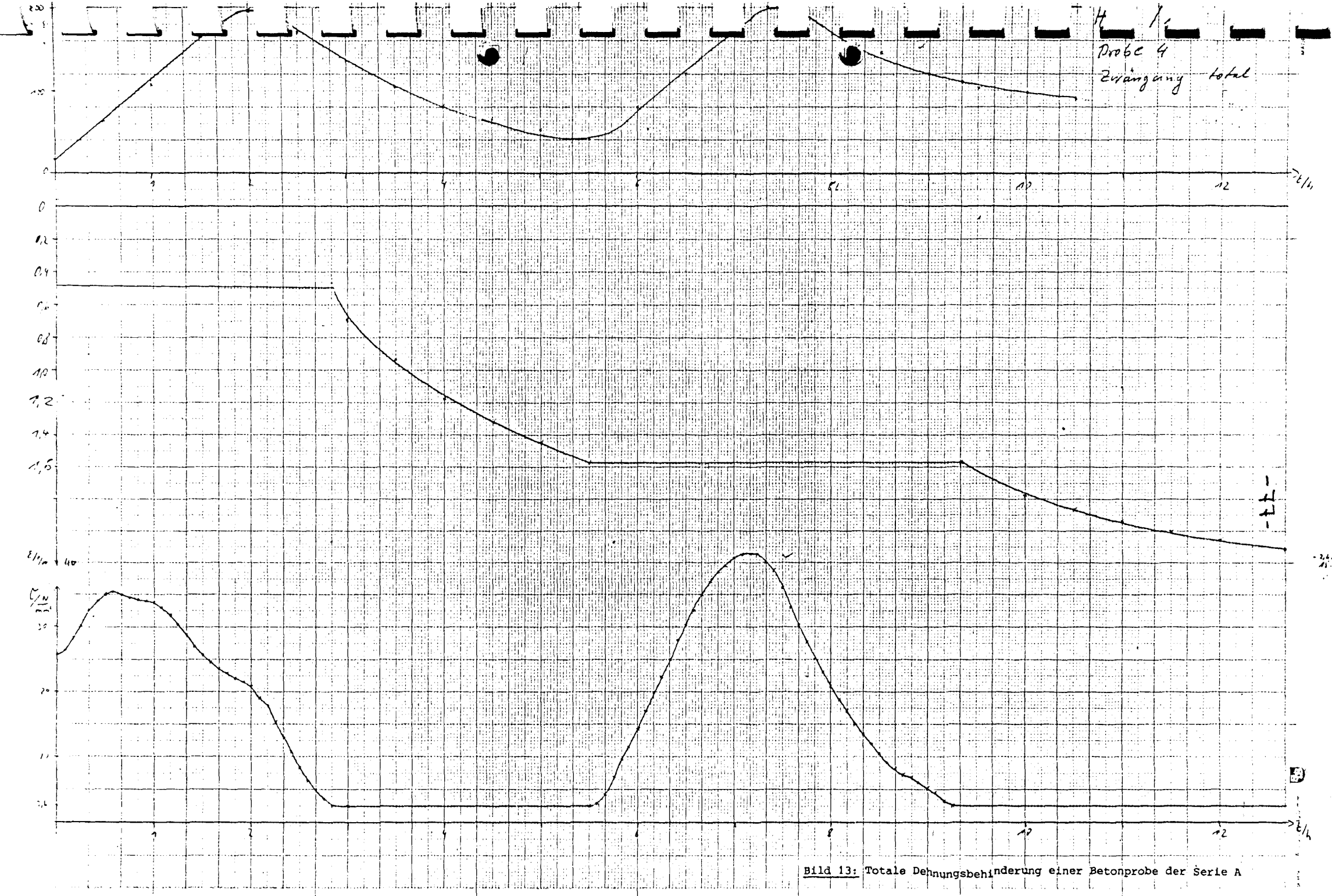
erhält man für 100 °C:

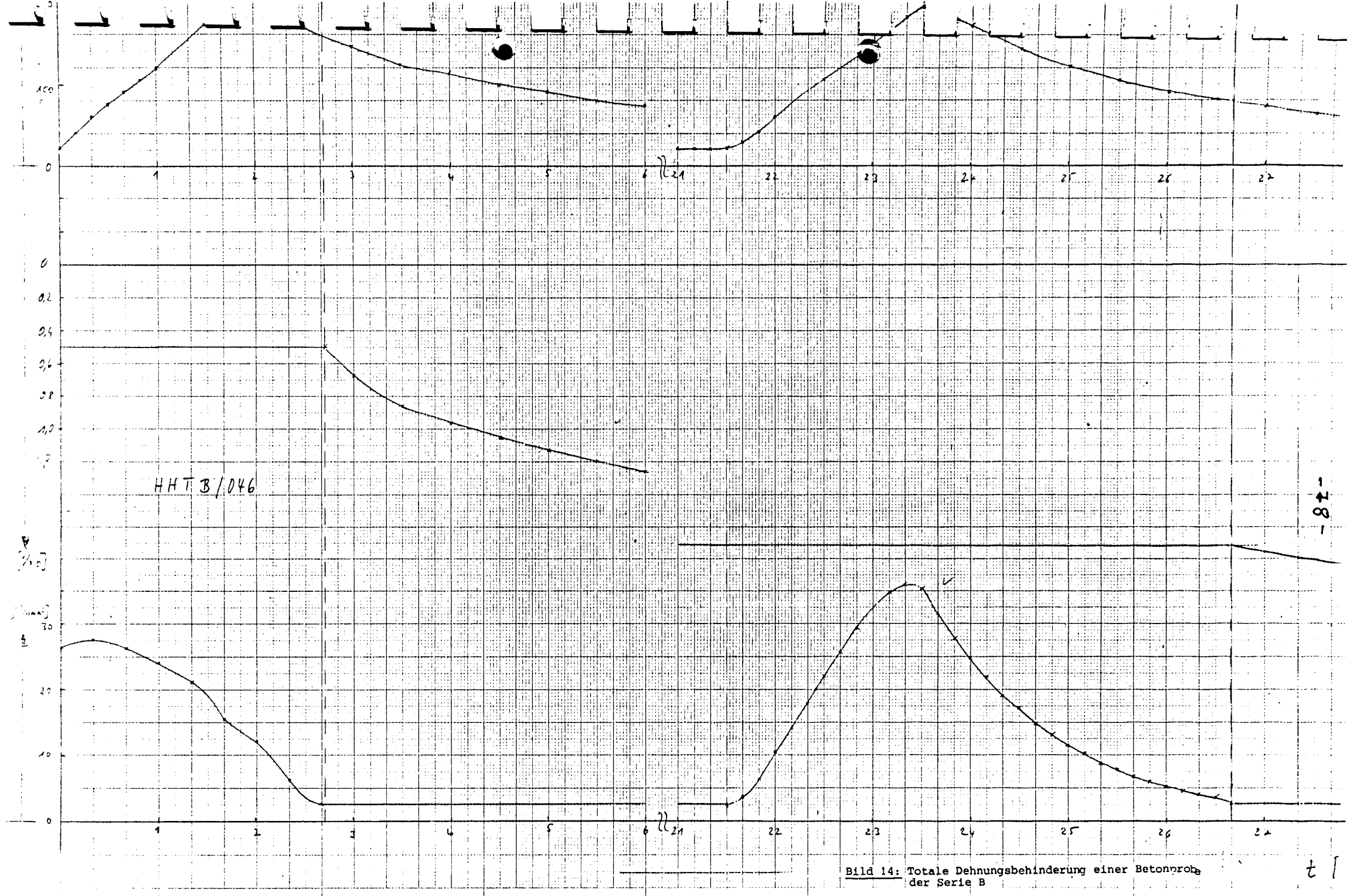
$$\sigma(100^\circ\text{C}) = \{\sigma_0 + 0,7 \cdot 10^{-5}/^\circ\text{C} \cdot 80^\circ\text{C} \cdot 33,1\} \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma(100^\circ\text{C}) = 21,1 \text{ N/mm}^2$$

und für 150 °C:

$$\sigma(150^\circ\text{C}) = 32,7 \text{ N/mm}^2.$$







Gemessen wurden dagegen bei 100 °C 20 N/mm<sup>2</sup> und bei 150 °C 32,5 N/mm<sup>2</sup>. Auch hier zeigt sich oberhalb 150 °C ein degressiver Verlauf der Zwängungsspannung trotz linearem Temperaturanstieg. Er ist auch hier auf plastische Verformungen zurückzuführen, wie die nach der zweiten Aufheizung bleibenden Verformungen von 0,36 % zeigen.

#### Zwängung vorgetrockneter Proben

Die Zwängungsversuche von 105 °C vorgetrockneten Probekörpern wurden nach der gleichen Methode durchgeführt, mit der die wassergelagerten Proben untersucht wurden (vergl. Bild 11 und 12). Gegenüber den wassergelagerten Proben fällt der deutlich höhere Anstieg der Zwängungsspannungen während der ersten Aufheizphase auf (s. Bild 15 und 16). Als Ursache dafür sind das Fehlen des Schwindens und die bekanntermaßen deutlich geringere Kriechneigung vorgetrockneter Betonproben anzusehen. Es lassen sich jedoch auch hier die Zwängungsspannungen mit Hilfe der angegebenen Kriechformel abschätzen. Jedoch ist man auf eine ziemlich grobe Abschätzung für  $\varphi$  angewiesen, da  $\varphi$ -Werte für vorgetrocknete Betonproben nur an Leichtbeton ermittelt wurden. Sie liegen für 100 °C in der Größenordnung von 0,2 und für 200 °C bei 0,4. Unter Verwendung von

$$\alpha_T = 0,94 \cdot 10^{-5} / ^\circ\text{C}, E(100^\circ\text{C}) = 38,3 \text{ kN/mm}^2 \text{ und } E(200^\circ\text{C}) = 25,7 \text{ kN/mm}^2$$

erhält man für die Serie A:

$$\sigma(100^\circ\text{C}) = \frac{0,61 + 0,76}{1 + 0,2} \cdot 38,3 \text{ N/mm}^2 = 43,6 \text{ N/mm}^2$$

bzw.

$$\sigma(200^\circ\text{C}) = \frac{0,61 + 1,69}{1 + 0,4} \cdot 25,7 \text{ N/mm}^2 = 42,3 \text{ N/mm}^2$$

Gemessen wurden bei 100 °C 40,0 N/mm<sup>2</sup> und bei 200 °C 40,0 N/mm<sup>2</sup>. Das bedeutet, daß die gemessenen Werte in guter Näherung mit dem instationären Kriechen und der Änderung des E-Moduls infolge Temperaturerhöhung erklärbar sind. Der zweite Temperaturzyklus verläuft dagegen nahezu "elastisch" und reversibel:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{max}} &= \sigma_0 + \alpha_T \cdot \Delta T \cdot E = (2,6 + 0,94 \cdot 10^{-5} / ^\circ\text{C} \cdot 100^\circ\text{C} \cdot 25,7) \text{ N/mm}^2 \\ &= 26,8 \text{ N/mm}^2. \end{aligned}$$



was durch die Messung ( $\sigma_{\max} = 30 \text{ N/mm}^2$ ) bestätigt wird. Das gleiche Verhalten zeigt die quarzärmere Serie B, jedoch treten hier aufgrund der geringeren thermischen Dehnung geringe Maximalspannungen auf. Gemessen wurde ein  $\sigma_{\max}$  bei der ersten Aufheizung von  $39,5 \text{ N/mm}^2$ . Die Rechnung ergibt mit den Annahmen:

$$\alpha_T = 0,70 \cdot 10^{-5} / ^\circ\text{C}, E(100^\circ\text{C}) = 39,6 \text{ kN/mm}^2, E(200^\circ\text{C}) = 23,5 \text{ kN/mm}^2.$$

$$\varphi(100^\circ\text{C}) = 0,2, \varphi(200^\circ\text{C}) = 0,4$$

für  $100^\circ\text{C}$   $\sigma = 38,9 \text{ N/mm}^2$  (gemessen:  $36,5 \text{ N/mm}^2$ ) und für  $200^\circ\text{C}$   $\sigma = 33,9 \text{ N/mm}^2$  (gemessen:  $32,0 \text{ N/mm}^2$ ). Für die zweite Aufheizung erhält man nach "elastischer" Rechnung ein  $\sigma_{\max} = 31 \text{ N/mm}^2$  (gemessen:  $24 \text{ N/mm}^2$ ).

Zusammenfassend ist festzustellen, daß die Unterschiede im Verlauf der Zwängungen zwischen Probekörpern, die bis zum Versuchsbeginn wassergelagert waren, und solchen, die bei  $105^\circ\text{C}$  vorgetrocknet waren, vor allem durch das unterschiedliche Schwind- bzw. Kriechvermögen hervorgerufen werden. Bei feuchtem Beton tritt nur eine geringe Erhöhung der (vergleichsweise hohen) Ausgangsspannung bei Erstaufheizung auf, während bei vorgetrockneten Proben relativ hohe Spannungsanstiege auftreten und deren weitere Erhöhung durch plastische Verformung der Probekörper verhindert wird. Der Einfluß der thermischen Dehnung ist hierbei von Bedeutung. Alle Probekörper der Serie B (mit der geringeren thermischen Dehnung) zeigten erwartungsgemäß geringere Zwängungsspannungen.

Bei der zweiten und allen weiteren zyklischen Belastungen verhalten sich die Probekörper quasi-elastisch bzw. reversibel. Eine Ausnahme bilden hier lediglich Probekörper, die beim zweiten Aufheizen beim Beginn des Temperaturanstiegs in der Dehnung behindert wurden (totale Zwängung). Hier treten nahezu unabhängig von der Größe des thermischen Ausdehnungskoeffizienten so hohe Zwängungen auf, daß in jedem Fall plastische Verformungen hervorgerufen werden, die einen weiteren Anstieg der Zwängungsspannungen verhindern. Die maximalen Zwängungsspannungen lagen bei 80 % der Kurzzeitdruckfestigkeit. Ein Versagen der Proben wurde unter diesen Bedingungen nicht beobachtet.

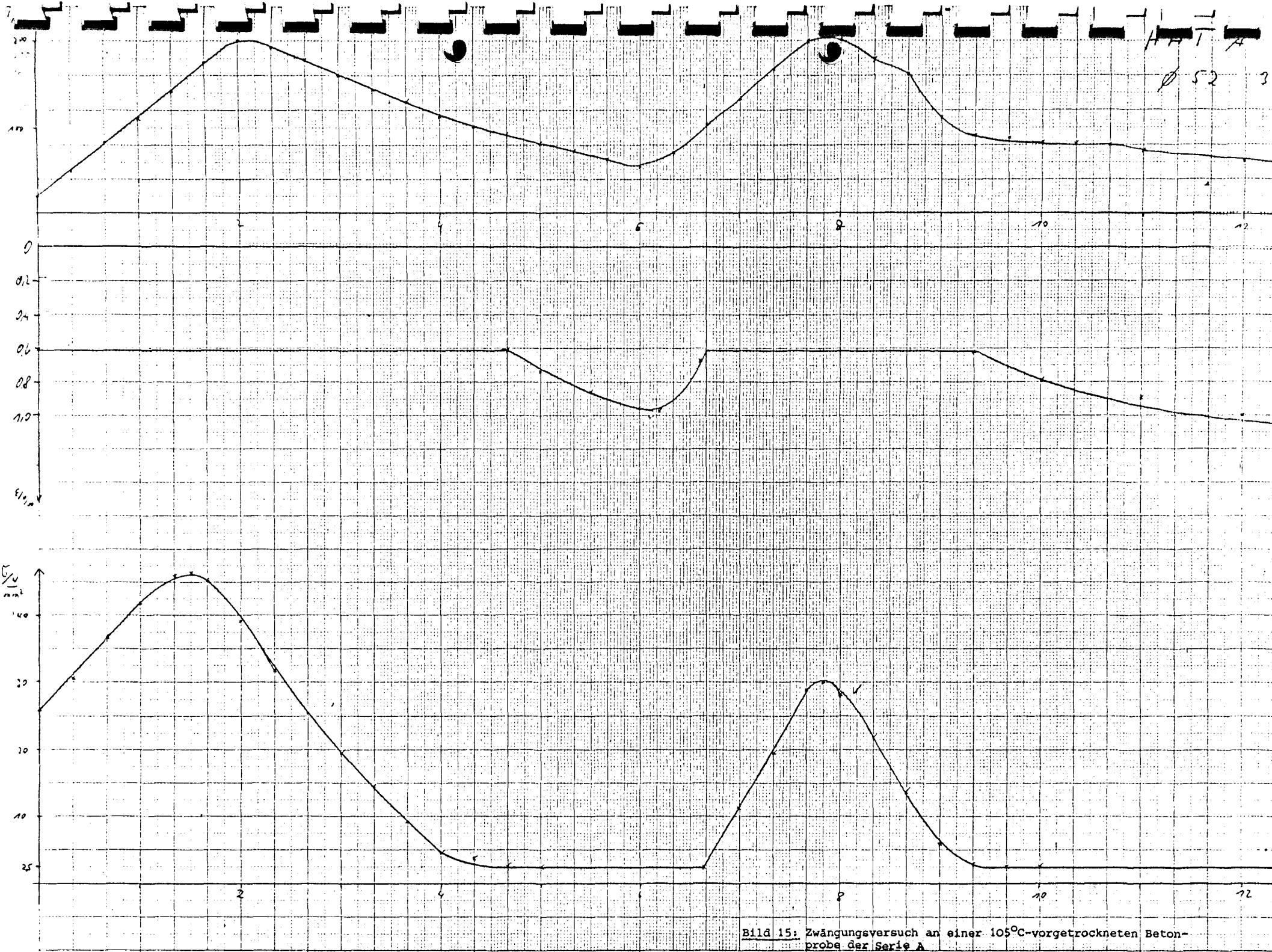


Bild 15: Zwängungsversuch an einer 105°C-vorgetrockneten Betonprobe der Serie A

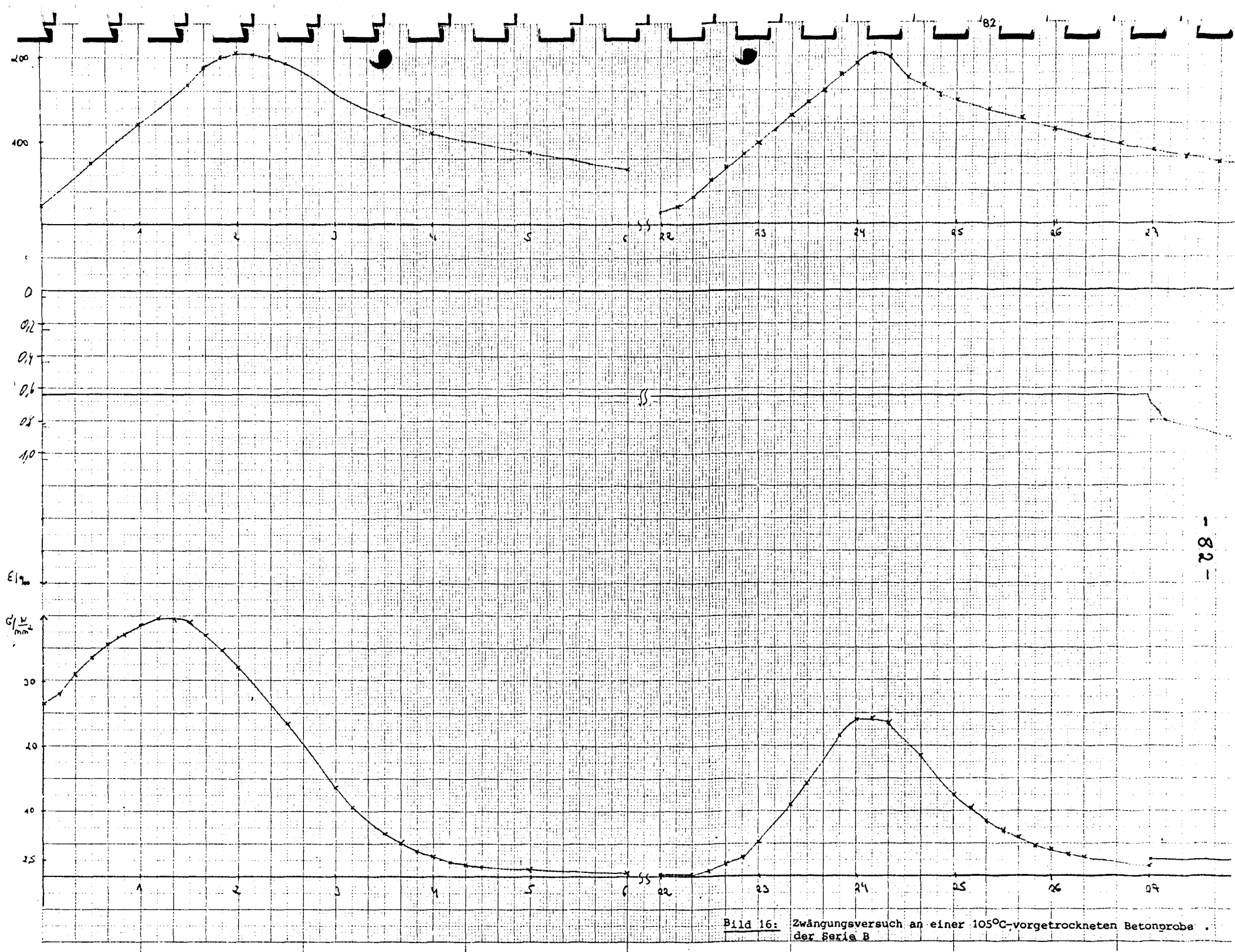


Bild 16: Zwängungsversuch an einer 105°C-vorgetrockneten Betonprobe der Serie B

## 15. Prüfung versiegelter Proben nach verschiedenen Temperaturbelastungen

Probekörper:	Zylinder 15/15 cm; 2 x 18 Stück
Lagerung:	90 Tage Wasserlagerung
Prüfung:	<p>Die Proben wurden nach dem Schleifen an die Universität Karlsruhe, Institut für Baustofftechnologie, gesandt, dort versiegelt und in diesem Zustand verschiedenen Temperaturbelastungen unterworfen (1 Tag, 7 Tage bzw. 28 Tage Dauertemperierung bei 250 °C) bzw. 5-malige zyklische Temperaturwechselbeanspruchung (20 °C - 200 °C - 20 °C). Anschließend wurden die Dichteänderungen und Festigkeiten bestimmt.</p> <p>Die genaue Versuchsführung ist uns nicht bekannt, sie ist beim Institut für Baustofftechnologie der Technischen Universität Karlsruhe zu erfragen.</p>

Die Ergebnisse der Messungen aus den einzelnen Probekörpern sind in den nachfolgenden Tabellen 12 bis 19 dargestellt. Die Tabelle 20 enthält eine Gegenüberstellung der Ergebnisse von Festigkeitsuntersuchungen an versiegelten und unversiegelten Probekörpern nach verschieden langen Temperatureinwirkungen bzw. zyklischen Temperaturbeanspruchungen. Darauf wird im folgenden näher eingegangen.

Bis auf die Proben der Serie B, die einen Tag lang im versiegelten Zustand bei 250 °C gelagert wurden und von denen offenbar nur 2 Versuche geglückt sind, weisen alle Probekörper nach den unterschiedlichen thermischen bzw. hygrothermischen Beanspruchungen Festigkeiten auf, die deutlich über den geforderten  $51 \text{ N/mm}^2$  liegen. Die Mittelwerte (ausgenommen Serie B nach eintägiger Dauertemperierung) liegen teilweise sogar recht deutlich über  $51 \text{ N/mm}^2$ . Eine eindeutige Koppelung eines erhöhten oder verminderten Festigkeitsverlusts mit der Versiegelung wurde nicht beobachtet bzw. läßt sich aus den vorliegenden Versuchsergebnissen nicht ableiten. Es scheint auch die Art der Temperierung eine Rolle zu spielen; so bringt beispielsweise die Versiegelung bei den Dauertemperaturversuchen einen Festigkeits-"Gewinn" gegenüber Temperatureinwirkung ohne Versiegelung, bei Temperaturwechsel ist dagegen das Umgekehrte der Fall. Vergleicht man beide Betonserien, so stellt man fest, daß der relative Festigkeitsverlust (abgesehen von der eintägigen Dauertemperierung bei Versiegelung) des quarzärmeren Betons (Serie B) in allen Fällen geringer als der Festigkeitsverlust des quarzreicheren Betons (Serie A) ausgefallen ist.

Tabelle 12:

Beton HHT A

1 Tag Dauertemperatur 250°C

**Proben Ø 150 x 150 mm versiegelt**

Probe Nr.	Probengröße			vor Temperierung		nach Temperierung			
	Ø x Höhe	V	A	G	ρ	G	ρ	F <sub>max</sub>	β <sub>D</sub>
	cm	dm <sup>3</sup>	mm <sup>2</sup> · 10 <sup>3</sup>	kg	kg/dm <sup>3</sup>	kg	kg/dm <sup>3</sup>	kN	N/mm <sup>2</sup>
0.36 a	15.0 x 14.8	2.615	17.67	6.593	2.521	6.590	2.520	970	54.9
0.38 a	15.0 x 14.9	2.633	17.67	6.724	2.554	6.726	2.554	1033	58.5
0.42 a	15.1 x 15.2	2.686	17.91	6.856	2.552	6.851	2.551	1003	56.0
im Mittel:					2.542		2.542		56.5

Bemerkungen: keine

Tabelle 13:

Beton HHT A.

7 Tage Dauertemperatur 250°C

**Proben Ø 150 x 150 mm versiegelt**

Probe Nr.	Probengröße			vor Temperierung		nach Temperierung			
	Ø x Höhe	V	A	G	ρ	G	ρ	F <sub>max</sub>	β <sub>D</sub>
	cm	dm <sup>3</sup>	mm <sup>2</sup> 10 <sup>3</sup>	kg	kg/dm <sup>3</sup>	kg	kg/dm <sup>3</sup>	kN	N/mm <sup>2</sup>
0.34 a	15.0 x 15.1	2.668	17.67	6.789	2.544	6.754 <sup>1)</sup>	2.531	1064	60.2
0.37 a	15.0 x 15.2	2.686	17.67	6.868	2.557	6.833 <sup>1)</sup>	2.544	1128	63.8
0.39 a	15.0 x 14.9	2.633	17.67	6.666	2.532	6.660	2.529	1108	62.7
im Mittel:					2.544		2.535		62.2

Bemerkungen: 1) z. T. Wasserverlust

Tabelle 14:

Beton HHT A  
28 Tage Dauertemperatur 250°C

**Proben Ø 150 x 150 mm versiegelt**

Probe Nr.	Probengröße			vor Temperierung		nach Temperierung			
	Ø x Höhe	V	A	G	ρ	G	ρ	F <sub>max</sub>	β <sub>D</sub>
	cm	dm <sup>3</sup>	mm <sup>2</sup> 10 <sup>3</sup>	kg	kg/dm <sup>3</sup>	kg	kg/dm <sup>3</sup>	kN	N/mm <sup>2</sup>
0.35 a	15.0 x 15.2	2.686	17.67	6.826	2.541	6.828	2.542	—	— 1)
0.40 a	15.0 x 15.0	2.651	17.67	6.774	2.556	6.770	2.554	1040	58.9
0.42 a	15.1 x 15.2	2.722	17.91	6.877	2.526	6.870	2.524	1050	58.6
0.37 b	15.1 x 15.2	2.722	17.91	6.878	2.526	6.826 2)	2.508	1110	62.0
0.40 b	15.0 x 15.3	2.704	17.67	6.929	2.563	6.920	2.559	1120	63.4
0.41 b	15.0 x 15.0	2.651	17.67	6.829	2.576	6.831	2.577	1105	62.5
im Mittel:					2.548		2.551	3)	61.1 3)

- Bemerkungen:
- 1.) falsche Prüfgeschwindigkeit, zu schnell
  - 2.) z. T. Wasserverlust
  - 3.) Mittel aus 5 Einzelwerten

T a b e l l e 15:

Beton HHT A  
5 Temperaturzyklen 20-200-20°C

**Proben Ø 150 x 150 mm versiegelt**

Probe Nr.	Probengröße			vor Temperierung		nach Temperierung			
	Ø x Höhe	V	A	G	ρ	G	ρ	F <sub>max</sub>	β <sub>D</sub>
	cm	dm <sup>3</sup>	mm <sup>2</sup> 10 <sup>3</sup>	kg	kg/dm <sup>3</sup>	kg	kg/dm <sup>3</sup>	kN	N/mm <sup>2</sup>
0.41 a	15.0 x 15.3	2.404	17.67	6.880	2.545	6.894	2.550	790	44.7
0.34 b	15.0 x 15.2	2.686	17.67	6.889	2.565	6.906	2.571	1000	56.6
0.35 b	15.0 x 15.2	2.686	17.67	6.898	2.568	6.909	2.572	650	36.8
0.36 b	15.0 x 15.2	2.686	17.67	6.869	2.557	6.884	2.563	945	53.5
0.38 b	15.0 x 15.1	2.668	17.67	6.838	2.563	6.854	2.569	1030	58.3
0.39 b	15.0 x 15.2	2.686	17.67	6.924	2.578	6.934	2.582	1080	61.1
im Mittel:					2.563		2.568		51.8

Bemerkungen:



Tabelle 16:

Beton HHT B  
1 Tag Dauertemperatur 250°C

Proben Ø 150 x 150 mm versiegelt

Probe Nr.	Probengröße			vor Temperierung		nach Temperierung			
	Ø x Höhe	V	A	G	ρ	G	ρ	F <sub>max</sub>	β <sub>D</sub>
	cm	dm <sup>3</sup>	mm <sup>2</sup> 10 <sup>3</sup>	kg	kg/dm <sup>3</sup>	kg	kg/dm <sup>3</sup>	kN	N/mm <sup>2</sup>
0.40 a	15.0 x 15.3	2.704	17.67	6.967	2.577	6.980	2.581	750	42.4
0.42 b	15.0 x 15.0	2.651	17.67	7.032	2.652	7.030	2.652	855	48.4
0.35 b	15.0 x 15.2	2.686	17.67	7.097	2.642	-	-	-	- 1)
im Mittel:					2.624		2.617		45.4

Bemerkungen: 1.) Probe bei Ausbau beschädigt

Tabelle 17:

Beton HHT B

7 Tage Dauertemperatur 250°C

## Proben Ø 150 x 150 mm versiegelt

Probe Nr.	Probengröße			vor Temperierung		nach Temperierung			
	Ø x Höhe	V	A	G	ρ	G	ρ	F <sub>max</sub>	β <sub>D</sub>
	cm	dm <sup>3</sup>	mm <sup>2</sup> 10 <sup>3</sup>	kg	kg/dm <sup>3</sup>	kg	kg/dm <sup>3</sup>	kN	N/mm <sup>2</sup>
0.35 a	15.1 x 15.1	2.704	17.91	6.991	2.585	6.990	2.585	1055	58.9
0.37 a	15.1 x 15.2	2.722	17.91	7.086	2.603	7.080	2.601	1060	59.2
0.37 b	15.1 x 15.1	2.704	17.91	7.056	2.602	7.030	2.600	1070	59.7
im Mittel:					2.610		2.595		59.3

Bemerkungen: keine

T a b e l l e 18:

Beton HHT B  
28 Tage Dauertemperatur 250°C

Proben Ø 150 x 150 mm versiegelt

Probe Nr.	Probengröße			vor Temperierung		nach Temperierung			
	Ø x Höhe	V	A	G	ρ	G	ρ	F <sub>max</sub>	β <sub>D</sub>
	cm	dm <sup>3</sup>	mm <sup>2</sup> 10 <sup>3</sup>	kg	kg/dm <sup>3</sup>	kg	kg/dm <sup>3</sup>	kN	N/mm <sup>2</sup>
0.41 a	15.0 x 15.1	2.668	17.67	6.953	2.606	6.960	2.607	1040	58.9
0.39 a	15.0 x 15.1	2.668	17.67	6.940	2.601	6.950	2.605	1068	60.4
0.42 a	15.0 x 15.1	2.668	17.67	6.993	2.621	7.000	2.624	1005	56.9
0.34 b	15.1 x 15.0	2.687	17.91	7.052	2.624	7.060	2.627	1105	61.7
0.39 b	15.1 x 15.1	2.704	17.91	7.096	2.624	7.100	2.626	1040	58.1
0.41 b	15.0 x 15.3	2.704	17.67	7.124	2.635	7.125	2.635	955	54.0
im Mittel:					2.619		2.621		58.3

Bemerkungen: k e i n e

T a b e l l e 19:

Beton HHT B

5 Temperaturzyklen 20-200-20°C

## Proben Ø 150 x 150 mm versiegelt

Probe Nr.	Probengröße			vor Temperierung		nach Temperierung			
	Ø x Höhe	V	A	G	ρ	G	ρ	F <sub>max</sub>	β <sub>D</sub>
	cm	dm <sup>3</sup>	mm <sup>2</sup> 10 <sup>3</sup>	kg	kg/dm <sup>3</sup>	kg	kg/dm <sup>3</sup>	kN	N/mm <sup>2</sup>
0.36 b	15.1 x 15.2	2.722	17.91	7.092	2.605	6.950	- 1)	-	-
0.34 a	15.0 x 15.0	2.651	17.67	6.925	2.612	6.955	2.624	1055	59.7
0.40 b	15.0 x 15.3	2.704	17.67	7.067	2.614	7.090	2.622	925	52.3
0.38 a	15.0 x 15.0	2.651	17.67	6.905	2.605	6.930	2.614	960	54.3
0.36 a	15.0 x 15.0	2.651	17.67	6.952	2.622	6.980	2.633	1037	58.7
0.38 b	15.0 x 15.2	2.686	17.67	7.033	2.618	7.070	2.632	863	48.8
im Mittel:					2.613		2.625		54.8

Bemerkungen: 1.) Versiegelung undicht

T a b e l l e 20:

Gegenüberstellung der mittleren Druckfestigkeiten von versiegelten und nicht versiegelten Betonproben der Serien A und B

Temperatur- lagerung [Tage]	Druckfestigkeit (versiegelte Proben) [N/mm <sup>2</sup> ]	Druckfestigkeit (unversiegelte Proben) [N/mm <sup>2</sup> ]	Thermische Belastung [°C]
Betonserie A			
1	56,5	-	Dauer- temperatur 250 °C
7	62,2	56,8	
28	61,1	55,7	
-	51,8	63,2	5 Zyklen 20-200-20 °C
90 Tage Wasser- lagerung	77,5	77,5	20 °C
Betonserie B			
1	45,4	-	Dauer- temperatur 250 °C
7	59,3	57,2	
28	58,3	55,3	
-	54,8	62,2	5 Zyklen 20-200-20 °C
90 Tage Wasser- lagerung	75,4	75,4	kalt

#### 16. Zusammenfassung

Die vorstehend beschriebenen Untersuchungen hatten zum Ziel, einen hochfesten, thermisch beständigen Massenbeton für den Einsatz im Kraftwerksbau zu entwickeln. Aufgrund vorliegender Erfahrungen wurde davon ausgegangen, daß ein derartiger "Normalbeton" vermutlich ehestens mit einem Basaltzuschlag unter Verwendung von Hochofenzement und Flugasche herzustellen ist. Der Basalt hat gegenüber anderen Zuschlägen folgende Vorteile:

- hohe Eigenfestigkeit,
- hohes spez. Gewicht (gute ~~g~~-Abschirmeigenschaften),
- niedrige thermische Dehnung,
- hohe thermische Stabilität,
- hohe Resistenz gegenüber Neutronenstrahlung.

Nachteilig sind dagegen vor allem seine vergleichsweise große, unregelmäßig ausgebildete Kornoberfläche (Splitt) und daraus resultierend eine schlechtere Verarbeitbarkeit eines Basaltbetons gegenüber einem vergleichbaren Beton mit Rundkorn.

Aufgrund von 12 Probemischungen wurden 2 Betonrezepturen ausgewählt, die Betone mit den gewünschten Anforderungen erwarten ließen. Im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit wurde auch ein Beton (Serie B) mit einer Ausfallkörnung ausgewählt. Dieser Beton war gegenüber der Betonserie A etwas schlechter zu verarbeiten, er ist jedoch voraussichtlich auch für den Baustellenbetrieb geeignet (pumpbar). Insbesondere können die hier beim Betonieren verwendeten Mengen an Superverflüssiger von 2 % in der Praxis noch auf mindestens 3 % erhöht werden, ohne daß hinsichtlich der Betonfestigkeit negative Auswirkungen zu erwarten sind. Die Verarbeitbarkeit des Betons B ließe sich dadurch wesentlich verbessern.

Beide Betone der Serien A und B erfüllen die gestellten Anforderungen (vgl. Abschnitt 1) ohne Einschränkungen. Da die Grenze der zulässigen Menge an Superverflüssiger (i. a. 3 %) noch nicht erreicht ist, bestehen in beiden Fällen hinsichtlich ihrer Verarbeitbarkeit noch Verbesserungsmöglichkeiten.

Zusammenfassend ist folgendes zu sagen: Die Proben der Serie B wiesen gegenüber denen der Serie A folgende, teilweise geringe Vorteile auf:

- deutlich geringere thermische Dehnungen,
- vergleichsweise geringere Zwängungen,
- geringere Festigkeitsverluste bei zyklischer und dauernder Temperatureinwirkung.

Als "nachteilig" gegenüber der Serie A sind

- die schlechtere Verarbeitbarkeit und
- die "geringere" (ca. 3 - 4 %) absolute Festigkeit

anzusehen. Zur Auswahl eines geeigneten HHT-Betons sind diese Kriterien und dazugehörig entsprechende Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen zugrunde zu legen. Eine endgültige Festlegung, welche Betonserien zukünftig als HHT-Beton weiter untersucht werden sollen, kann nur im Vergleich mit allen anderen Betonserien der am Untersuchungsprogramm beteiligten Institute erfolgen.

### A n h a n g

Im vorliegenden Anhang sind weitere Versuchsergebnisse zusammengestellt, die im Auftrage einzelner Institute durchgeführt wurden. Die speziellen betontechnologischen Details liegen uns nicht vor, so daß darauf nicht weiter eingegangen wird. Ein Vergleich mit den zugeordneten Versuchsergebnissen der Betonserien A und B des vorstehenden Berichts ist möglich, weil teilweise identische Versuche durchgeführt wurden.



## I. Zwängungsversuche an Probekörpern der Universität Karlsruhe

- Probekörper: Zylinder 8/30 cm; 9 Stück (5 Stck. Serie B 1, 4 Stck. Serie B 2)
- Lagerung: Nach der Anlieferung wurden die Proben der Folie entnommen und bis zur Versuchsdurchführung (90 Tage) unter Wasser gelagert.
- Vorbehandlung: vgl. Abschnitt 14, Zwängungsversuche
- Prüfung: Es wurde nach dem in Abschnitt 14 erläuterten Schema vorgegangen, wobei die 3 Belastungsfälle:
- a) Zwängung - wassergelagert,
  - b) Zwängung - total
  - c) Zwängung - 105 °C vorgetrocknet
- untersucht wurden.

### Erläuterung:

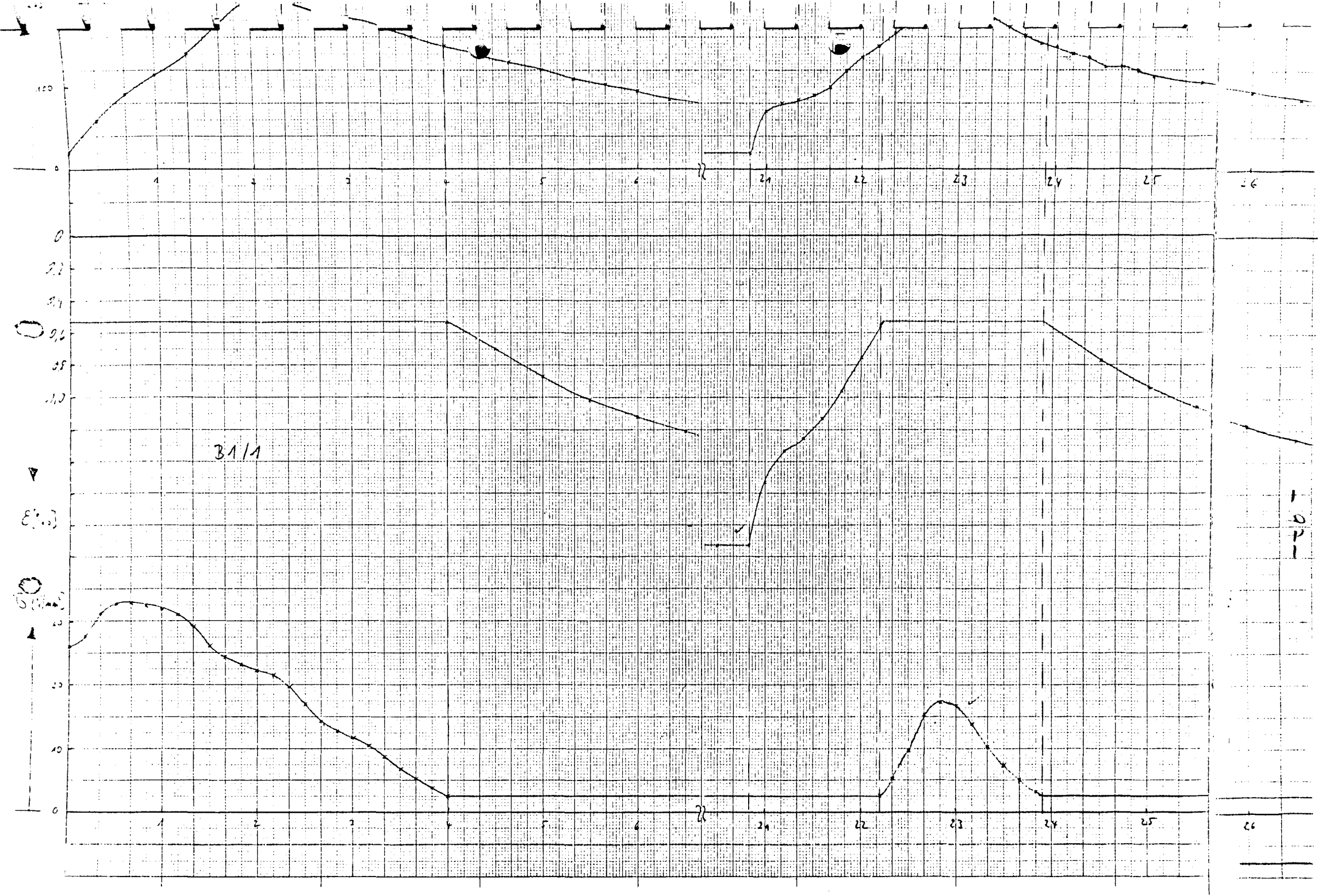
Die Meßergebnisse sind in den nachfolgenden Bildern 17 bis 25 dargestellt. Um die Reproduzierbarkeit der Versuche zu überprüfen, wurden die Versuche teilweise an gleichartigen Probekörpern doppelt ausgeführt. Die einzelnen Ergebnisse unterscheiden sich i. a. nur geringfügig von den an den Braunschweiger Betonserien A und B gewonnenen Werten. Im folgenden werden nur solche Ergebnisse diskutiert, die in der Tendenz von den Ergebnissen der Braunschweiger Betone abwichen oder völlig anders waren.

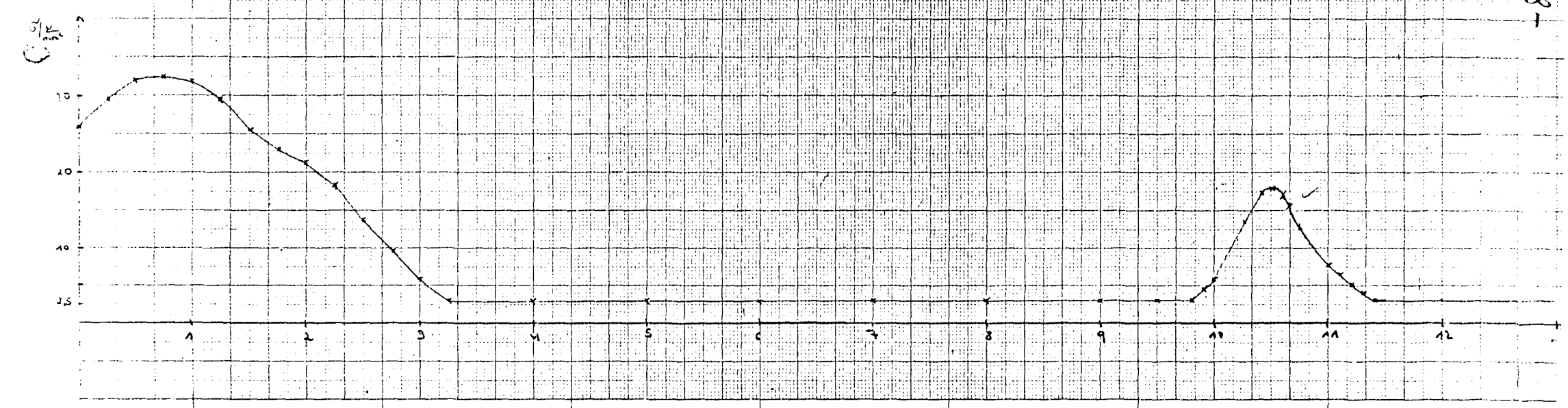
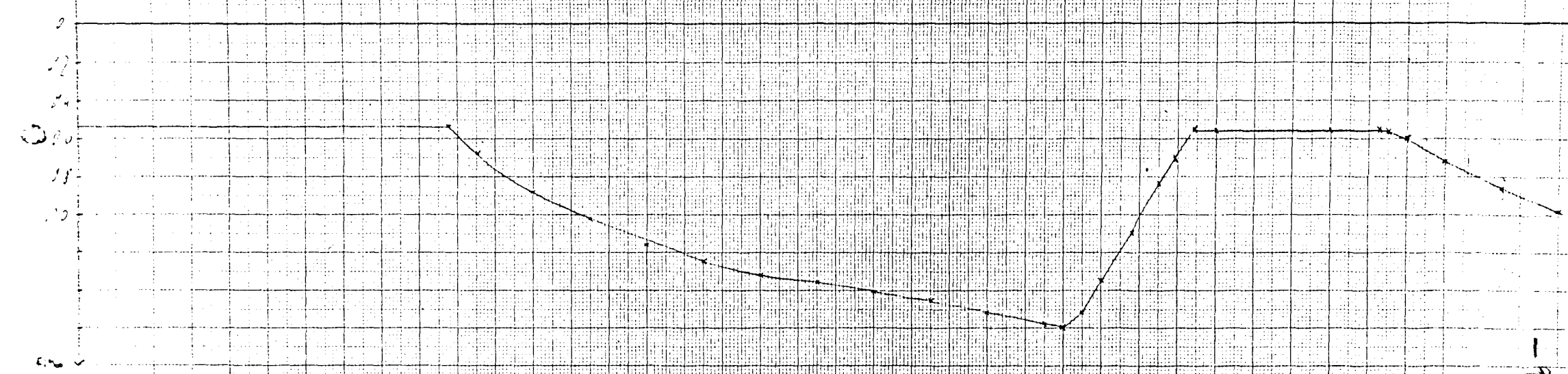
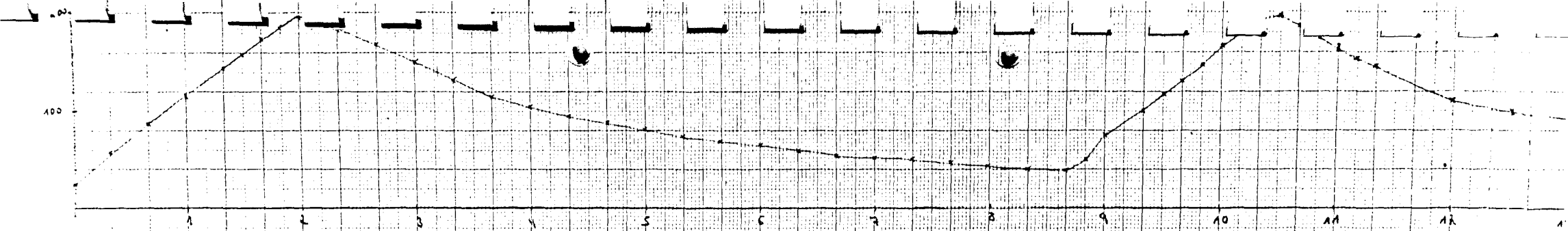
### Zwängung - wassergelagert

Die Ergebnisse der wassergelagerten Betonproben sind auf den Bildern 17 bis 20 dargestellt. Der Verlauf der Zwängungsspannungen unterscheidet sich weder bei der ersten Aufheizung noch bei weiteren zyklischen Temperatureinwirkungen wesentlich von dem der Braunschweiger Betone, jedoch liegen die maximalen Zwängungsspannungen beim 1. Aufheizen sowohl bei der Serie B 1 mit 32,5 N/mm<sup>2</sup> als auch bei der Serie B 2 mit 36 N/mm<sup>2</sup> höher als die Spannungen der Braunschweiger Serien A (31 N/mm<sup>2</sup>) und B (28,5 N/mm<sup>2</sup>). Auch bei den nachfolgenden Zyklen bleibt die Tendenz bestehen:

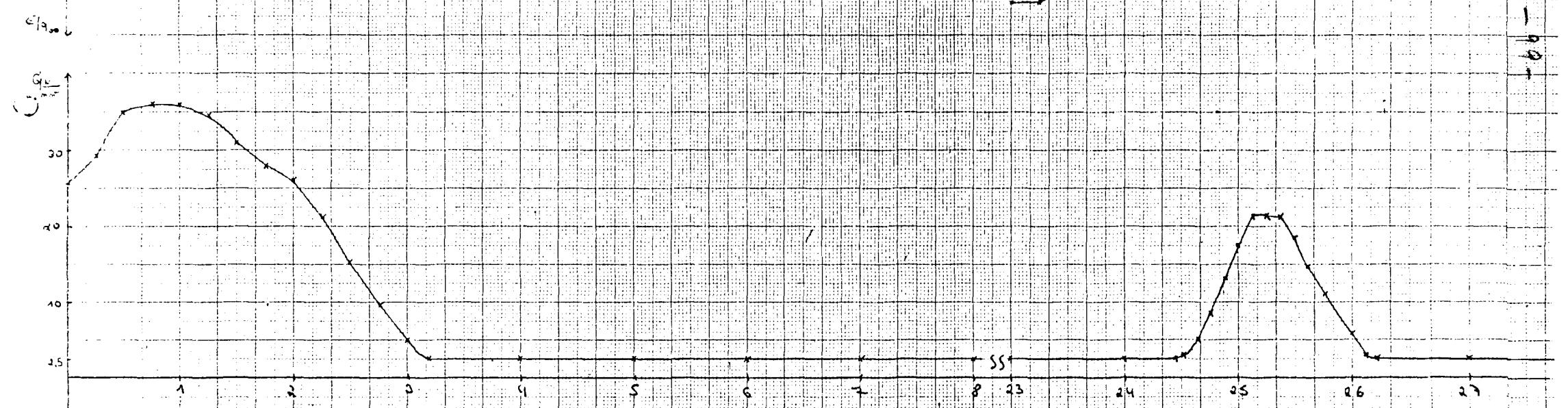
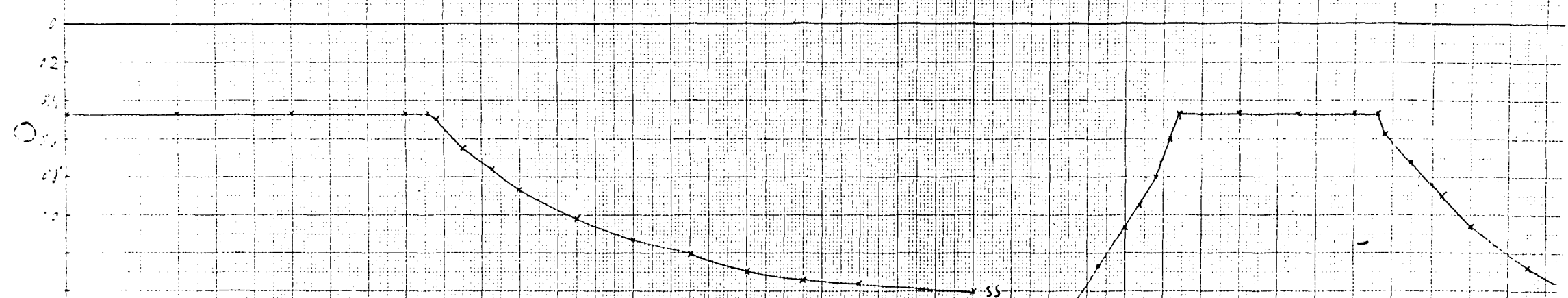
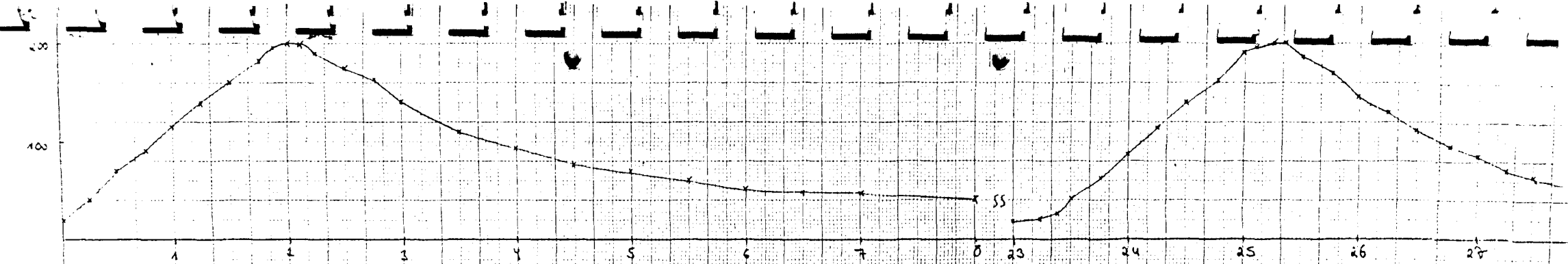
$$\begin{array}{ll} \text{Karlsruhe B 1:} & \sigma_{\max} = 17,5 \text{ N/mm}^2; \text{ B 2: } \sigma_{\max} = 21,0 \text{ N/mm}^2, \\ \text{Braunschweig Serie A:} & \sigma_{\max} = 12,5 \text{ N/mm}^2; \text{ S.B: } \sigma_{\max} = 8,0 \text{ N/mm}^2. \end{array}$$

Als Ursache dafür dürfte die höhere thermische Dehnung der Karlsruher Betone ( $\alpha_T \approx 1,05 \cdot 10^{-5}/^\circ\text{C}$  für beide Serien) gegenüber den Braunschweiger Betonen ( $\alpha_{T,A} \approx 0,94 \cdot 10^{-5}/^\circ\text{C}$ ,  $\alpha_{T,B} \approx 0,70 \cdot 10^{-5}/^\circ\text{C}$ ) in Betracht kommen. Der Unterschied zwischen den beiden Karlsruher Betonen dürfte dagegen in erster Linie auf geringe Unterschiede im E-Modul zurückzuführen sein. So wurden an den erkalteten Proben nach den Zwängungsversuchen E-Moduln von 34 kN/mm<sup>2</sup> (Serie B 1) bzw. 38 kN/mm<sup>2</sup> (Serie B 2) ermittelt.

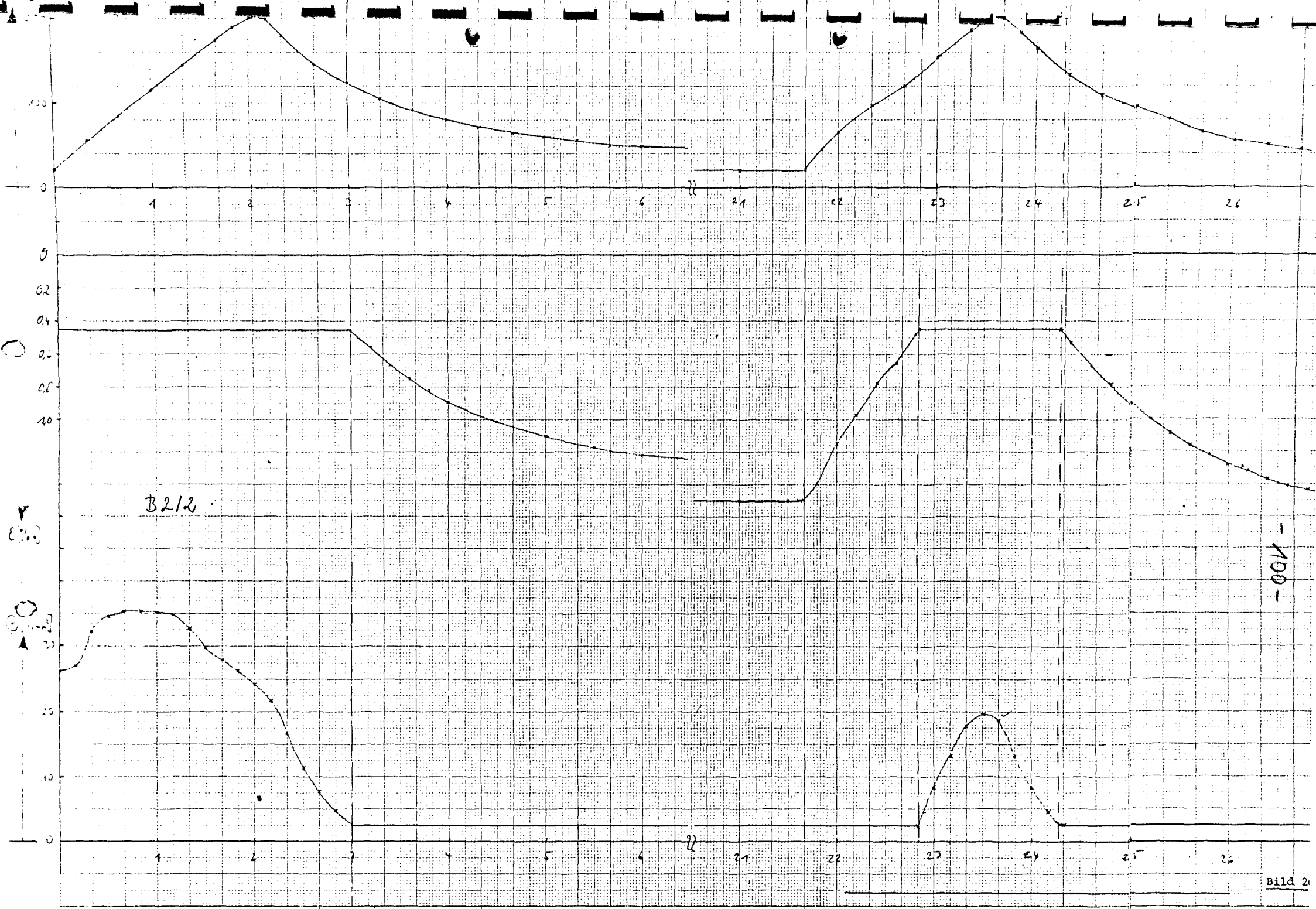




-98-



199-



Aus den Bildern 17 und 18 bzw. 19 und 20 geht im übrigen hervor, daß die Versuche vergleichsweise gut reproduzierbar sind. Bei mehrfachen Temperaturzyklen bleiben die Zwängungsspannungen wie erwartet im elastischen Bereich.

#### Zwängung - total

Die Versuchsergebnisse sind auf den Bildern 21 und 22 dargestellt. Auch bei dieser Versuchsart traten gegenüber den Ergebnissen von Braunschweiger Versuchskörpern nur geringe Veränderungen im Verlauf der Zwängungsspannungen auf, jedoch übersteigen die Maximalspannungen bei der zweiten Aufheizung die Braunschweiger Werte beträchtlich:

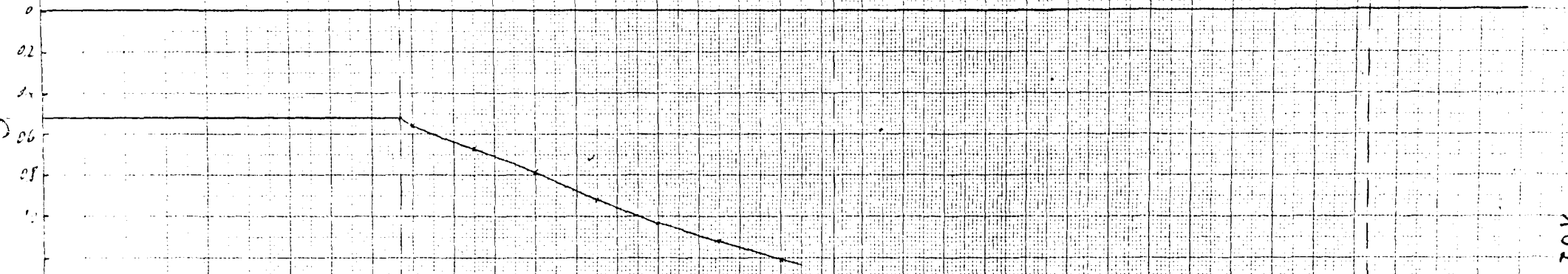
$$\begin{array}{ll} \text{Karlsruhe B 1:} & \sigma_{\max} = 49,0 \text{ N/mm}^2; \text{ B 2:} & \sigma_{\max} = 52,5 \text{ N/mm}^2 \\ \text{Braunschweig Serie A:} & \sigma_{\max} = 41,5 \text{ N/mm}^2; \text{ Serie B:} & \sigma_{\max} = 36,0 \text{ N/mm}^2 \end{array}$$

Sie erreichen sogar die geforderte Druckfestigkeit von  $51 \text{ N/mm}^2$  bzw. überschreiten sie. Die Ursache dafür liegt auch hier in dem relativ hohen Ausdehnungskoeffizienten und einem vermutlich vergleichsweise hohen E-Modul.

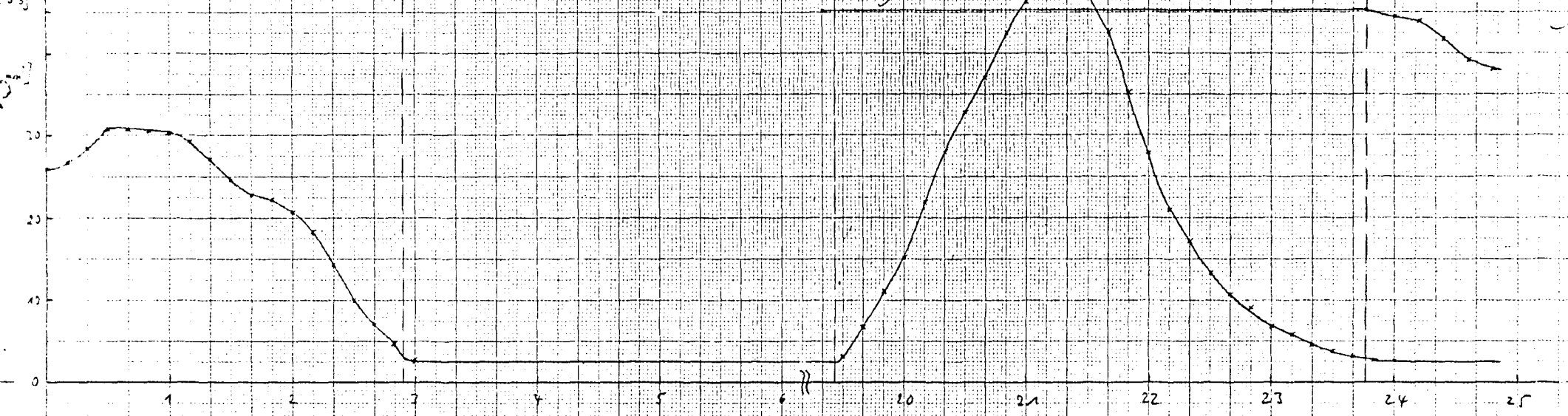
#### Zwängung - $105^\circ\text{C}$ - vorgetrocknet

Die gleichen Ursachen, die für die sehr hohen Zwängungsspannungen bei den sogenannten "totalgezwängten" Proben verantwortlich sind (hohe thermische Dehnung, hoher E-Modul), rufen auch die relativ hohen Spannungen bei der ersten Aufheizung der mit  $105^\circ\text{C}$  vorgetrockneten Proben hervor ( $45 \text{ N/mm}^2$  bei Serie B 1,  $46 \text{ N/mm}^2$  bei Serie B 2), die in einem Fall sogar zum vorzeitigen Bruch der Probe führten (s. Bild 23). Bei dem zweiten und dritten Aufheizen treten ebenfalls die gleichen Phänomene wie bei den Braunschweiger Proben auf. Hier sind sie jedoch mit erheblich höheren Zwangsspannungen verbunden ( $\sigma_{\max} = 33,5 \text{ N/mm}^2$  - Serie B 1;  $\sigma_{\max} = 31,5 \text{ N/mm}^2$  - Serie B 2). Vermutlich ist der thermisch bedingte Abfall des E-Moduls nicht so ausgeprägt wie bei den Braunschweiger Betonen. Ein Versagen der Proben beim zweiten Aufheizen wurde nicht beobachtet (s. Bild 24 und 25). Der auf Bild 23 dargestellte Versuch ist danach vermutlich als "Ausreißer" zu werten.





31/4



- 102 -

Bild 21: Zwangsversuch einer Betonprobe der Karlsruher Serie B I bei totaler Dehnungsbehinderung

t. [6]

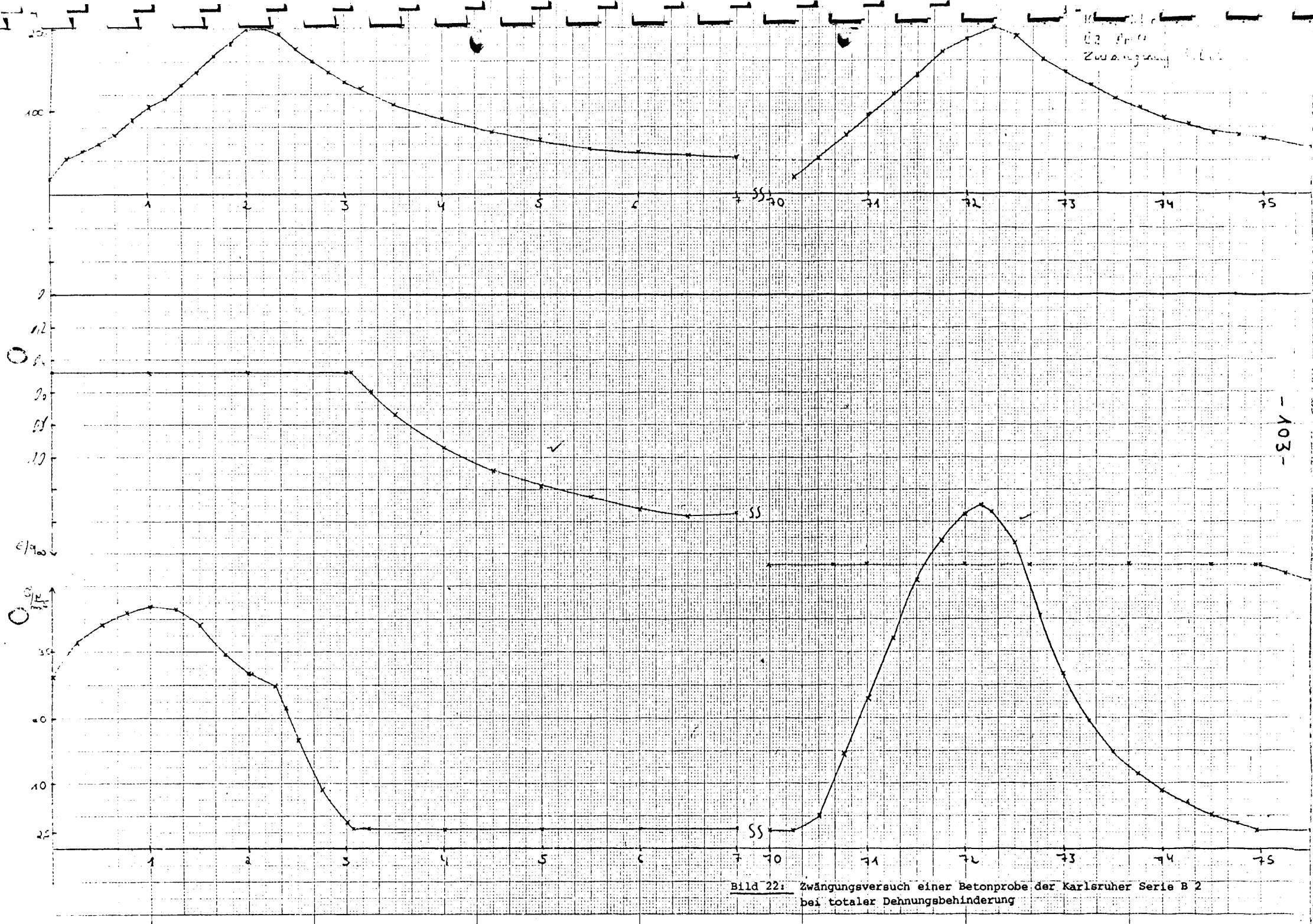


Bild 22: Zwangsversuch einer Betonprobe der Karlsruher Serie B 2  
bei totaler Dehnungsbehinderung



Karlsruhe

Ba P. 3

105°C vorgetrocknet

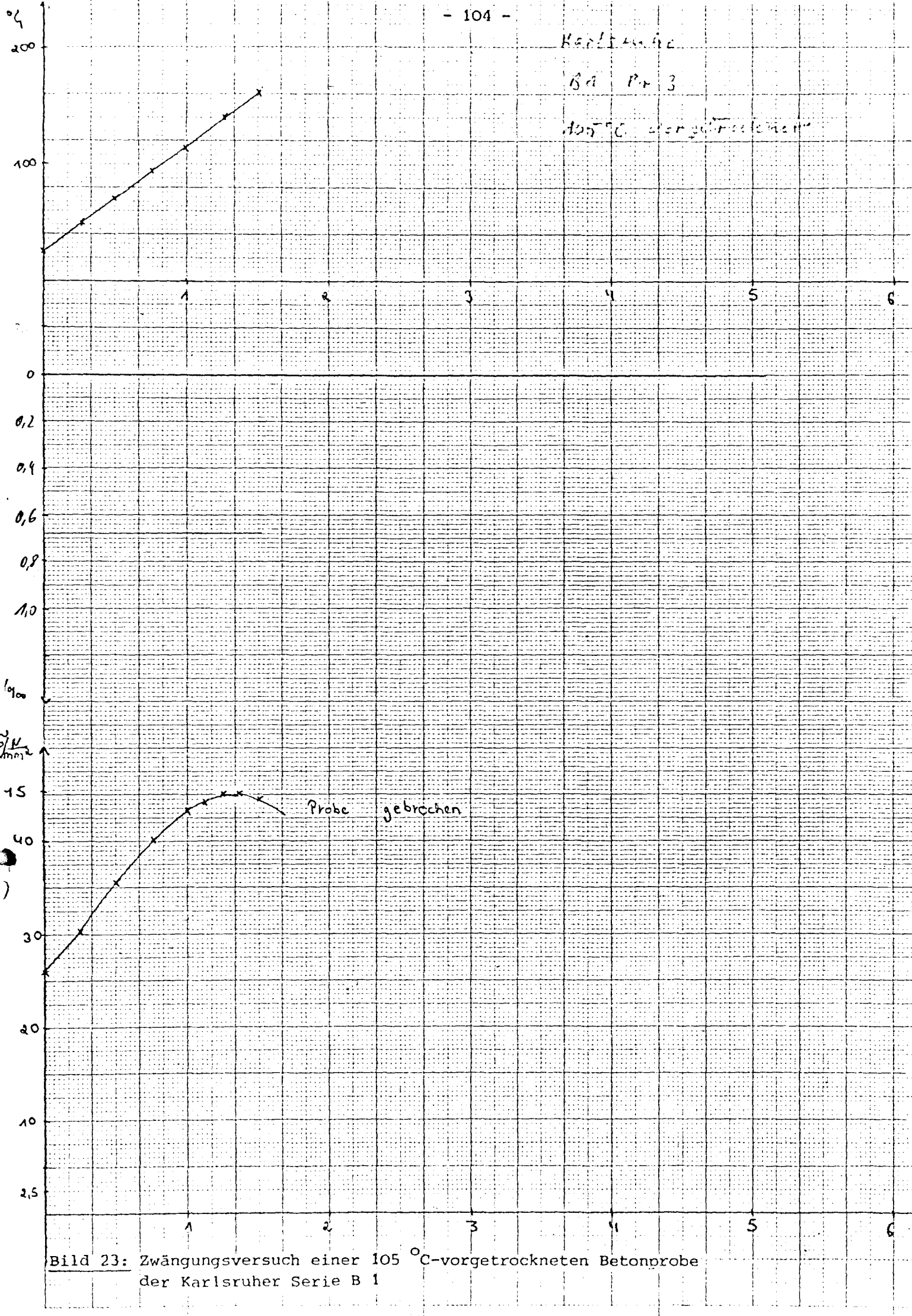


Bild 23: Zwängungsversuch einer 105 °C-vorgetrockneten Betonprobe der Karlsruher Serie B 1

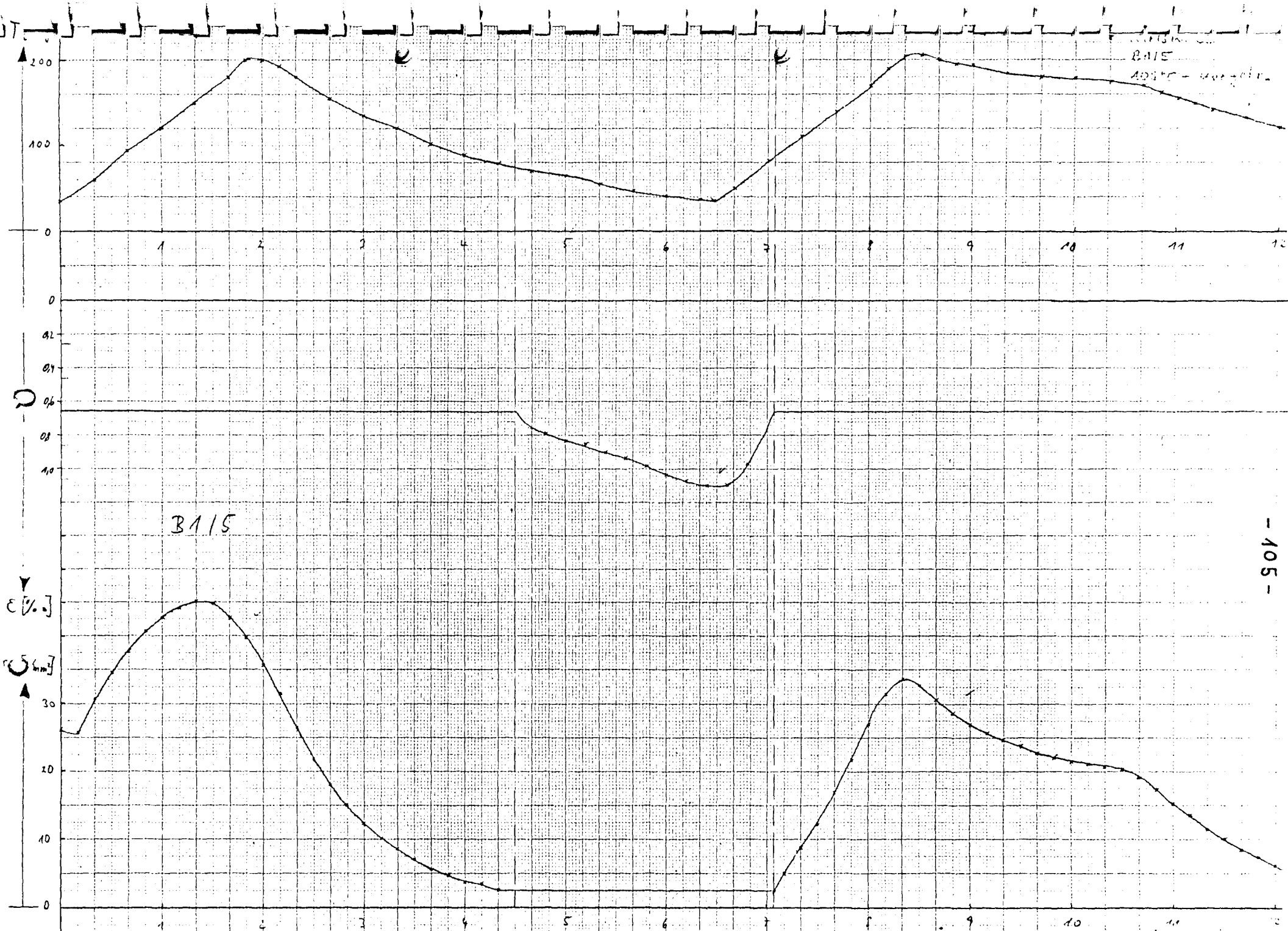
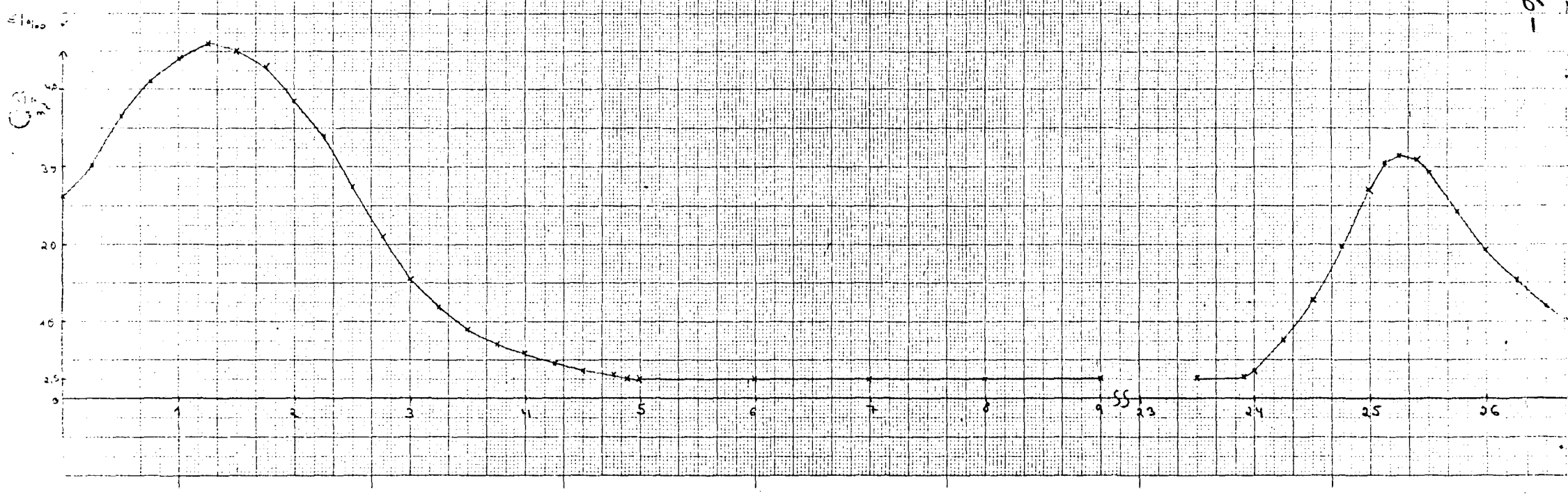
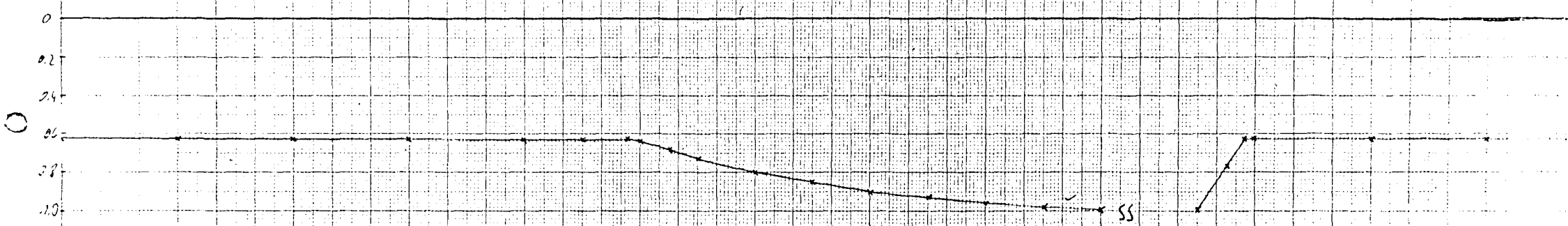
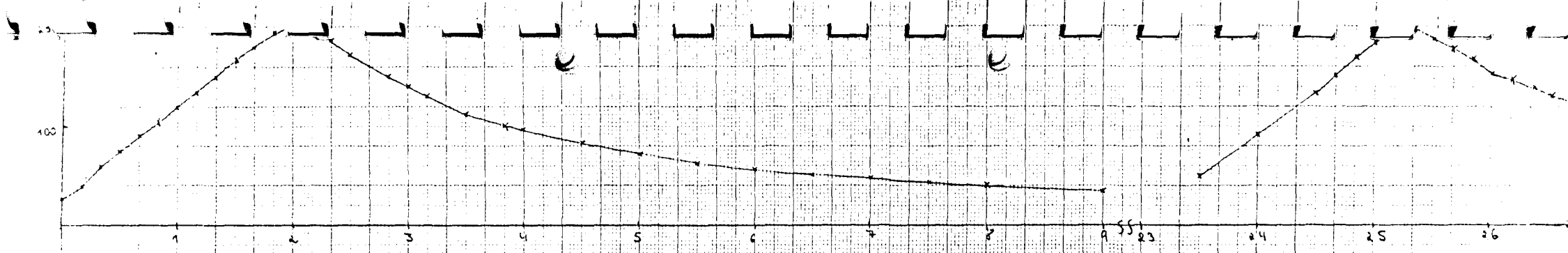


Bild 24: Zwängungsversuch einer 105 °C-vorgetrockneten Betonprobe der Karlsruher Serie B 1

t [h]

- 105 -



-106-

## II. Zwängungsversuche an Probekörpern aus Seibersdorf

- Probekörper: Zylinder 8/30 cm; 9 Stück (6 Stck. Serie hk, 3 Stck. Serie gj)
- Lagerung: Nach Anlieferung wurden die Proben sofort ausgepackt und nach dem Entfernen der Plastikfolien bis zur Versuchsdurchführung (90 Tage) unter Wasser gelagert
- Vorbehandlung: vergl. Abschnitt 14, Zwängungsversuche
- Prüfungen: Es wurde nach dem in Abschnitt 14 erläuterten Schema verfahren, wobei die 3-folgenden Belastungsfälle untersucht wurden:
- a) Zwängung - wassergelagert
  - b) Zwängung - total
  - c) Zwängung - 105 °C vorgetrocknet

### Erläuterung:

Die Meßergebnisse sind auf den nachfolgenden Bildern 26 bis 34 dargestellt. Zu Kontrollzwecken wurden einige Versuche mehrfach ausgeführt. Die Ergebnisse unterscheiden sich nur geringfügig von den an den Braunschweiger und Karlsruher Betonserien gewonnenen Werten. Im folgenden werden daher nur die beim Seibersdorfer Beton als typisch erscheinenden Abweichungen diskutiert.

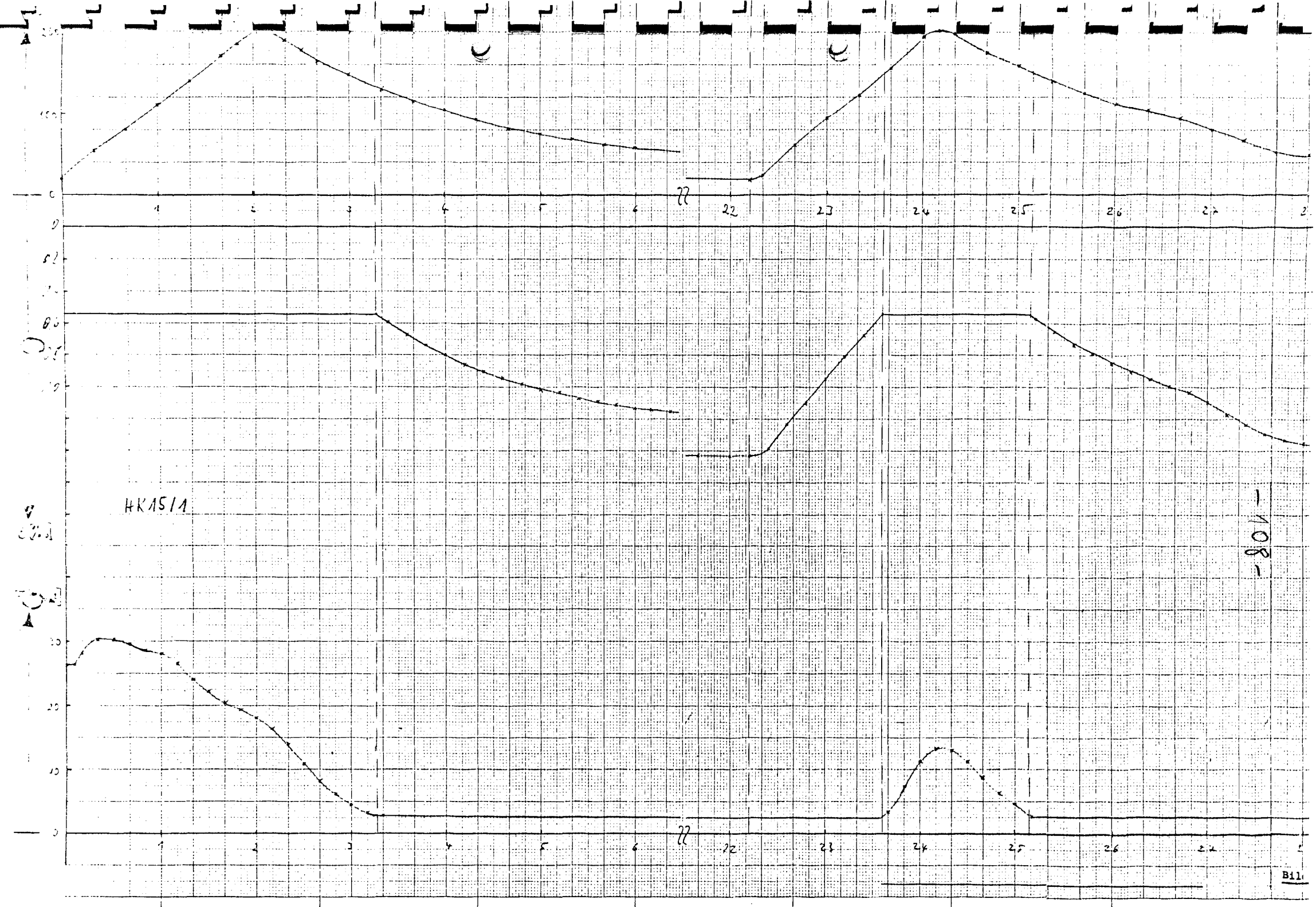
### Zwängung - wassergelagert

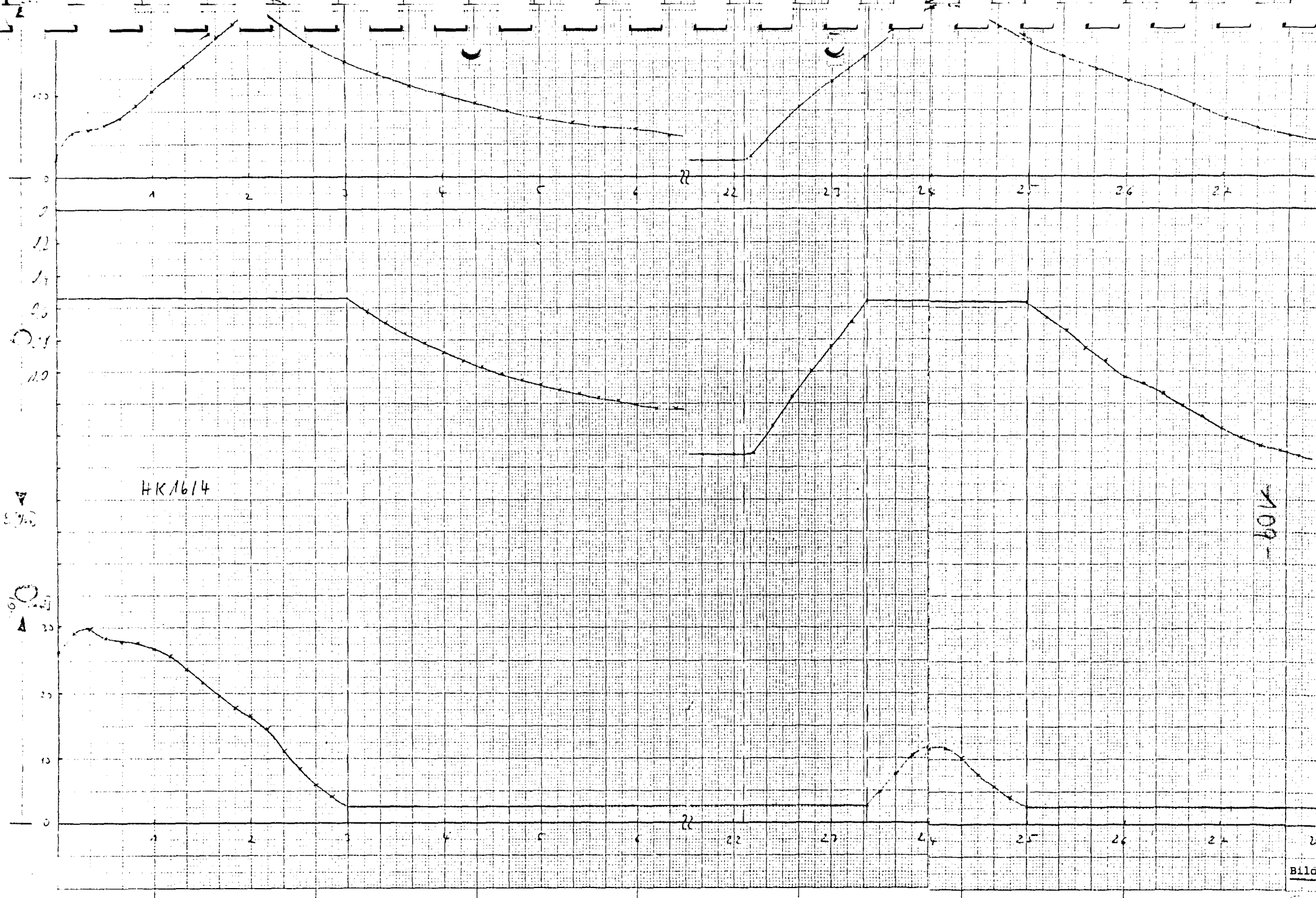
Die im folgenden diskutierten Versuche sind auf den Bildern 26 bis 29 dargestellt. Der Verlauf der Zwängungsspannungen unterscheidet sich nur wenig von den bei den Braunschweiger Betonen beobachteten Werten. Auch die Maximalspannungen während der ersten Aufheizung sind mit den Braunschweiger Werten nahezu identisch:

$$\begin{array}{ll} \text{Seibersdorf hk:} & \sigma_{\max} = 30,5 \text{ N/mm}^2; \text{ gj:} & \sigma_{\max} = 29,0 \text{ N/mm}^2, \\ \text{Braunschweig Serie A:} & \sigma_{\max} = 31,0 \text{ N/mm}^2 & \text{Serie B: } \sigma_{\max} = 28,5 \text{ N/mm}^2. \end{array}$$

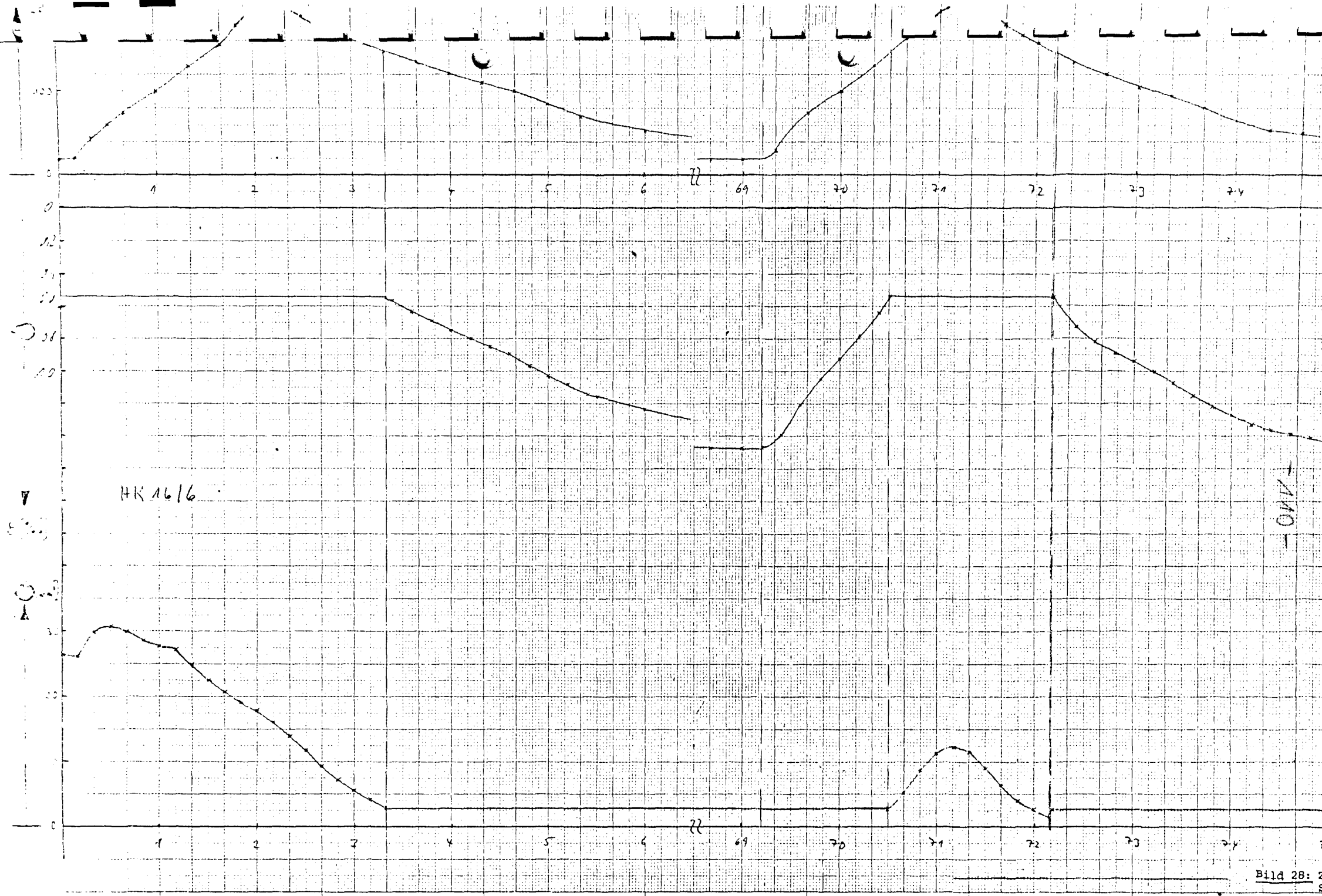
Das gilt auch für die nachfolgenden Zyklen; so wurden für die zweite Aufheizung folgende Maximalspannungen ermittelt:

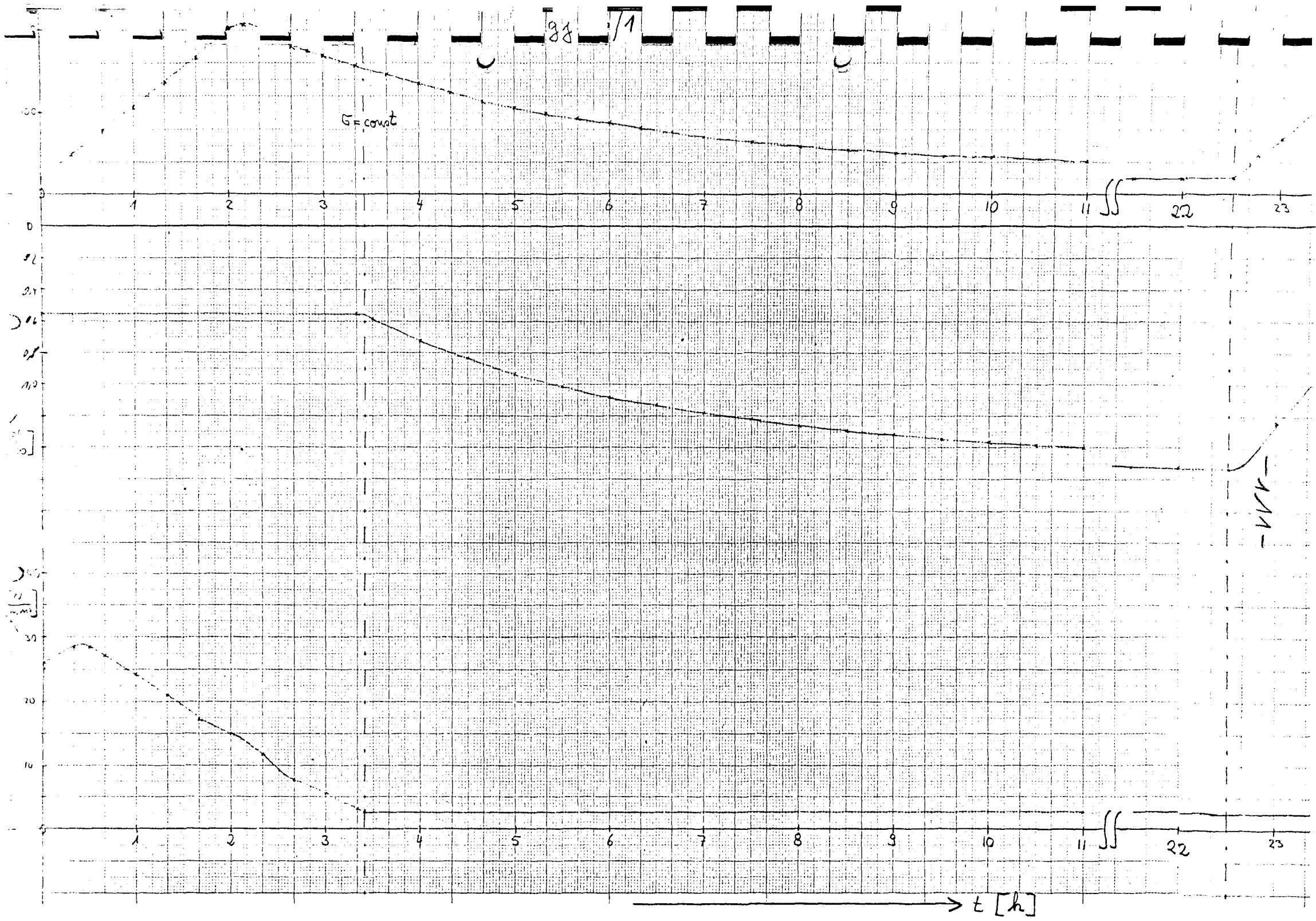
$$\begin{array}{ll} \text{Seibersdorf hk:} & \sigma_{\max} = 12,5 \text{ N/mm}^2, \text{ gj:} & \sigma_{\max} = 9,5 \text{ N/mm}^2 \\ \text{Braunschweig Serie A:} & \sigma_{\max} = 12,5 \text{ N/mm}^2, & \text{Serie B: } \sigma_{\max} = 8,0 \text{ N/mm}^2 \end{array}$$













Die geringen Abweichungen sind mit Unterschieden in den thermischen Dehnungen (im ausgetrockneten Zustand, entnommen aus den Zwängungsdiagrammen):

$$\begin{array}{ll} \text{Seibersdorf hk:} & \alpha_T = 0,77 \cdot 10^{-5}/^{\circ}\text{C}; \text{ gj:} & \alpha_T = 0,70 \cdot 10^{-5}/^{\circ}\text{C}, \\ \text{Braunschweig Serie A:} & \alpha_T = 0,94 \cdot 10^{-5}/^{\circ}\text{C}; \text{ Serie B:} & \alpha_T = 0,70 \cdot 10^{-5}/^{\circ}\text{C} \end{array}$$

und wohl auch durch geringe Unterschiede im Kriech- bzw. Schwindverhalten und im E-Modul zu begründen.

#### Zwängung - total

Die im folgenden beschriebenen Versuche sind auf den Bildern 30 und 31 dargestellt. Auch bei dieser Versuchsart zeigen sich im grundsätzlichen Verlauf der Zwängungsspannungen keine Unterschiede gegenüber den Braunschweiger und Karlsruher Betonen. Jedoch liegen die Maximalspannungen bei der zweiten Aufheizung aufgrund der geringeren thermischen Dehnung wesentlich unter den Maximalspannungen der übrigen Betone. Lediglich der Braunschweiger Beton der Serie B, der die gleiche thermische Dehnung wie die Kalksteinbetone aufweist, zeigt ähnlich geringere Maximalspannungen:

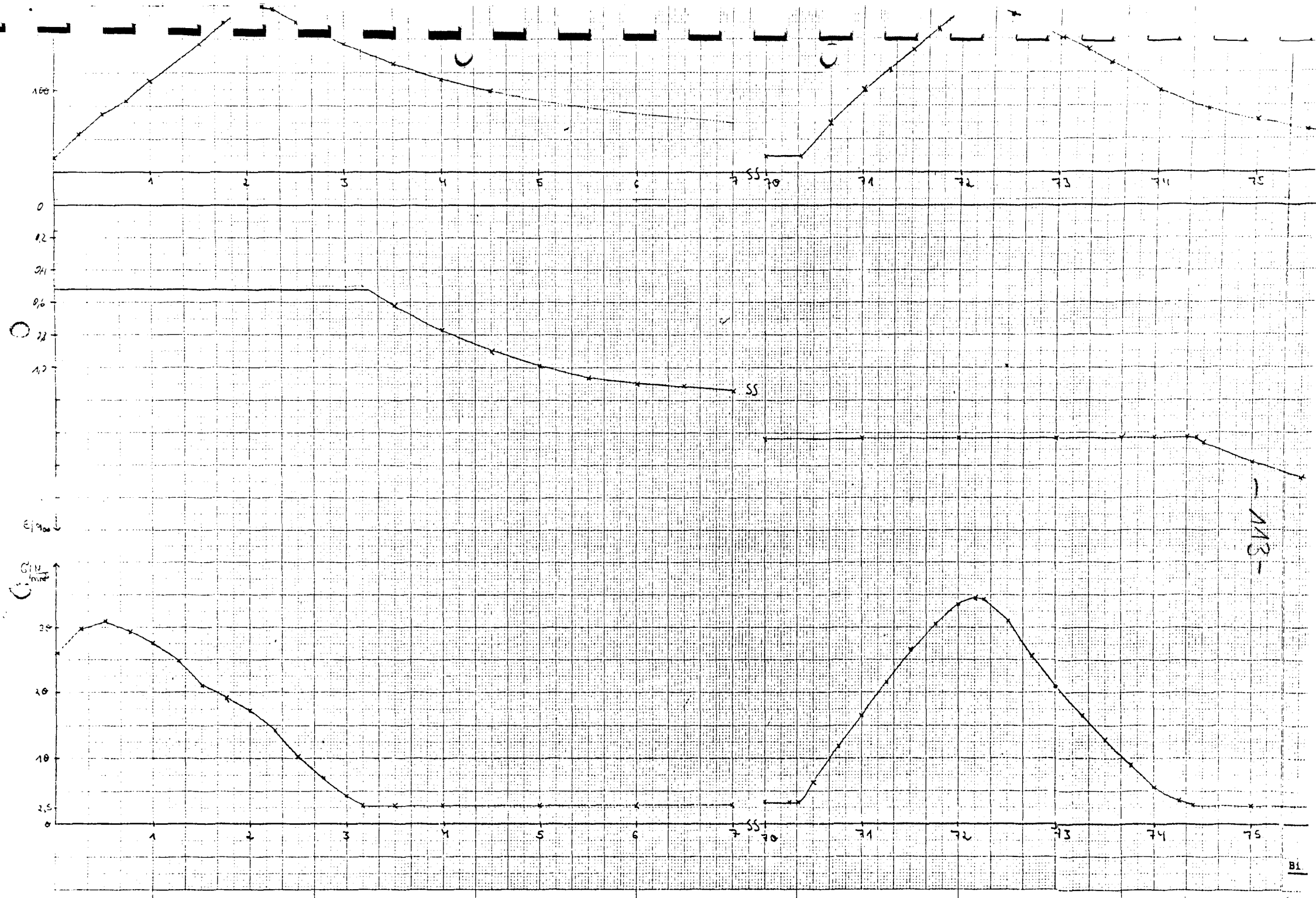
$$\begin{array}{ll} \text{Seibersdorf hk:} & \sigma_{\max} = 34,5 \text{ N/mm}^2; \text{ gj:} & \sigma_{\max} = 32,5 \text{ N/mm}^2, \\ \text{Braunschweig Serie A:} & \sigma_{\max} = 41,5 \text{ N/mm}^2; \text{ Serie B:} & \sigma_{\max} = 36,0 \text{ N/mm}^2. \end{array}$$

#### Zwängung - 105 °C - vorgetrocknet

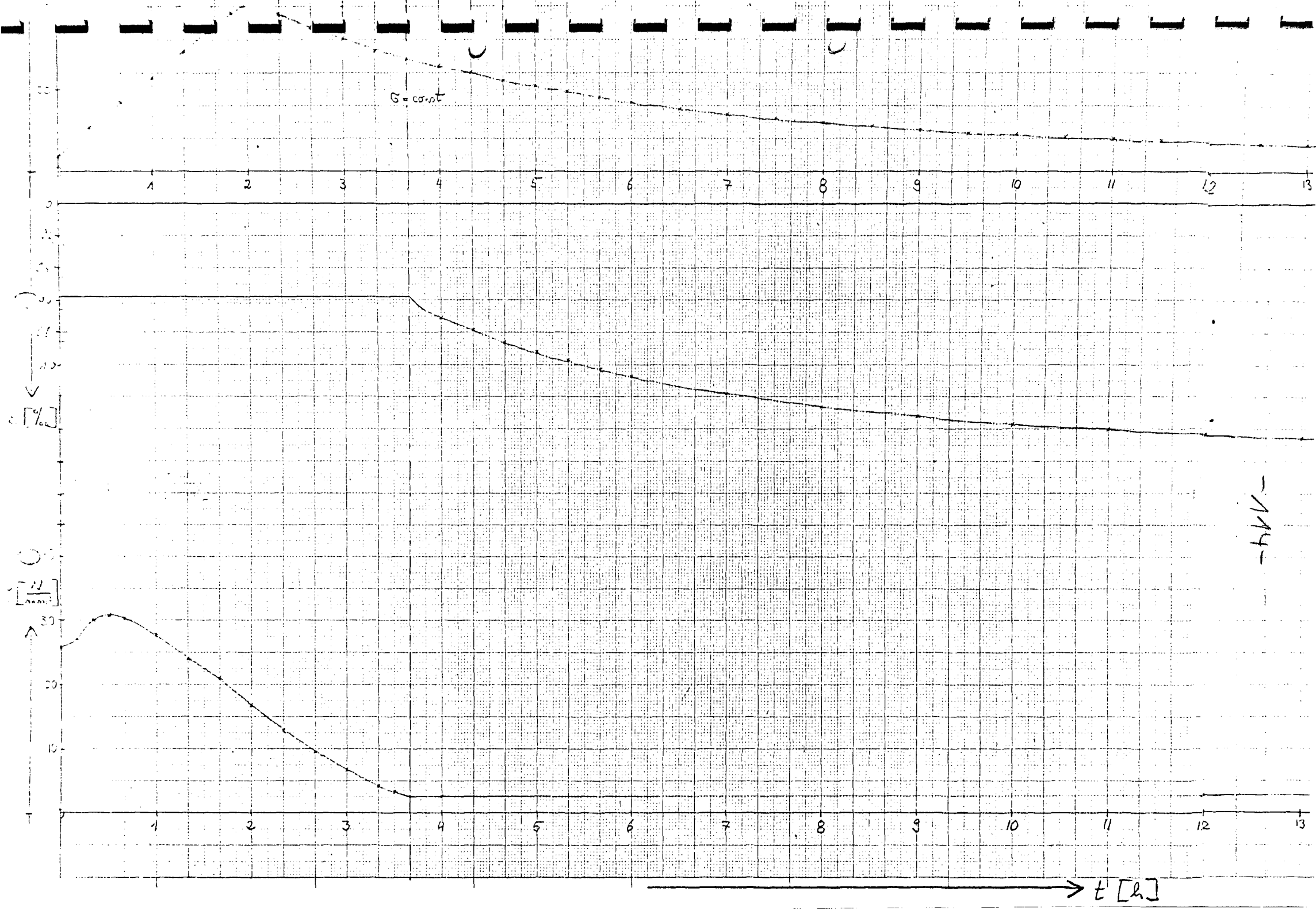
Auch in diesem Fall wirkt sich die geringere thermische Dehnung des Kalksteinbetons günstig auf die Zwängkraftentwicklung aus (s. Bild 32 bis 34). Nur der Braunschweiger Basaltbeton B zeigt ähnlich niedrige Maximalspannungen bei der ersten Aufheizung. Alle anderen, insbesondere die Karlsruher Betone, liegen darüber:

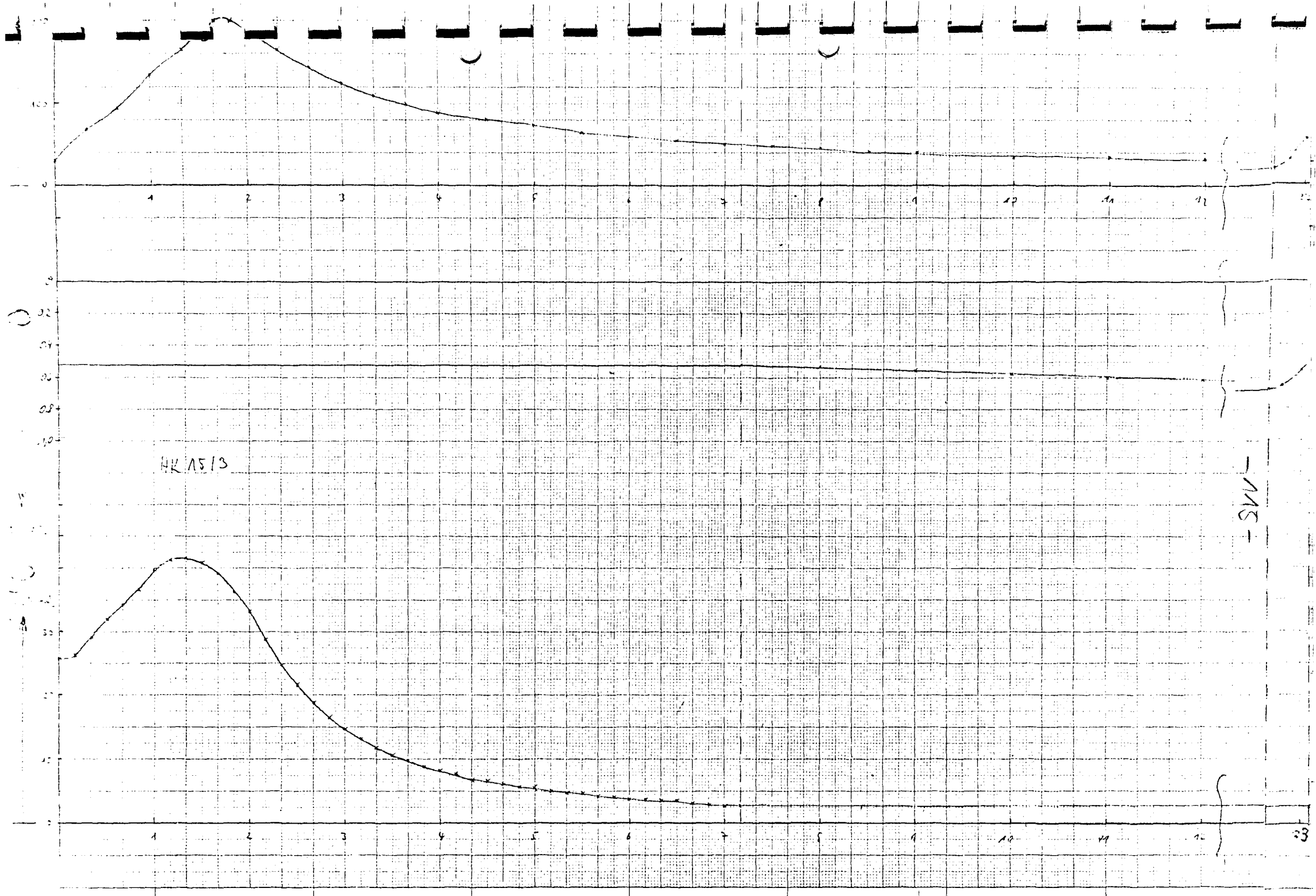
$$\begin{array}{ll} \text{Seibersdorf hk:} & \sigma_{\max} = 40,0 \text{ N/mm}^2; \text{ gj:} & \sigma_{\max} = 43,5 \text{ N/mm}^2 \\ \text{Braunschweig Serie A:} & \sigma_{\max} = 46,0 \text{ N/mm}^2; \text{ Serie B:} & \sigma_{\max} = 40,0 \text{ N/mm}^2. \end{array}$$

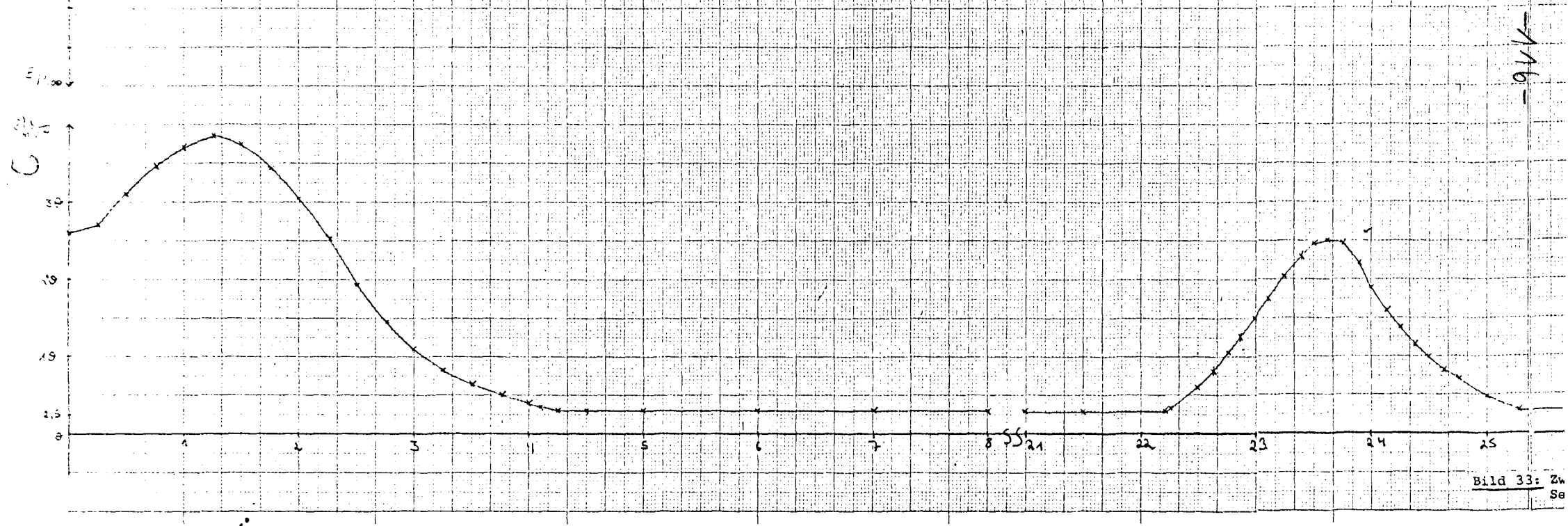
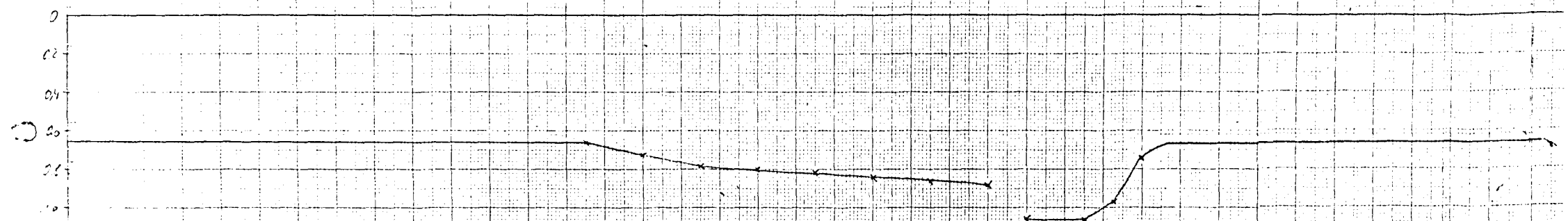
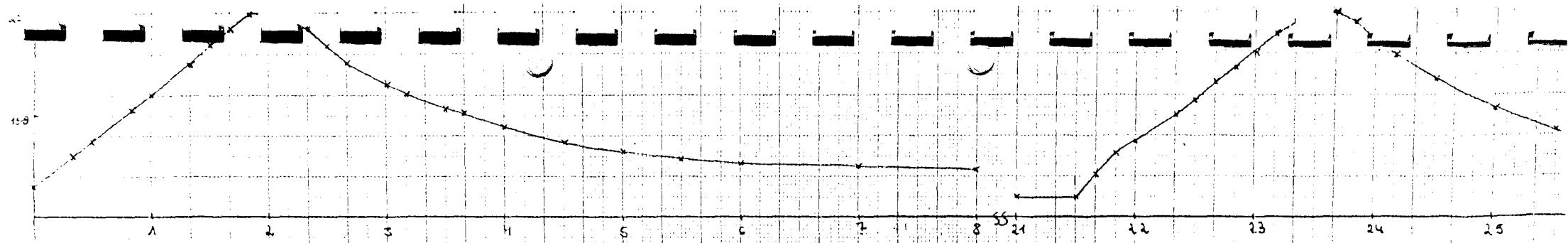
Die etwas höhere Maximalspannung der Serie gj resultiert aus einer geringen Überschreitung der Maximaltemperatur im Versuch, dabei erfolgte die Aufheizung statt auf 200 °C auf 208 °C.



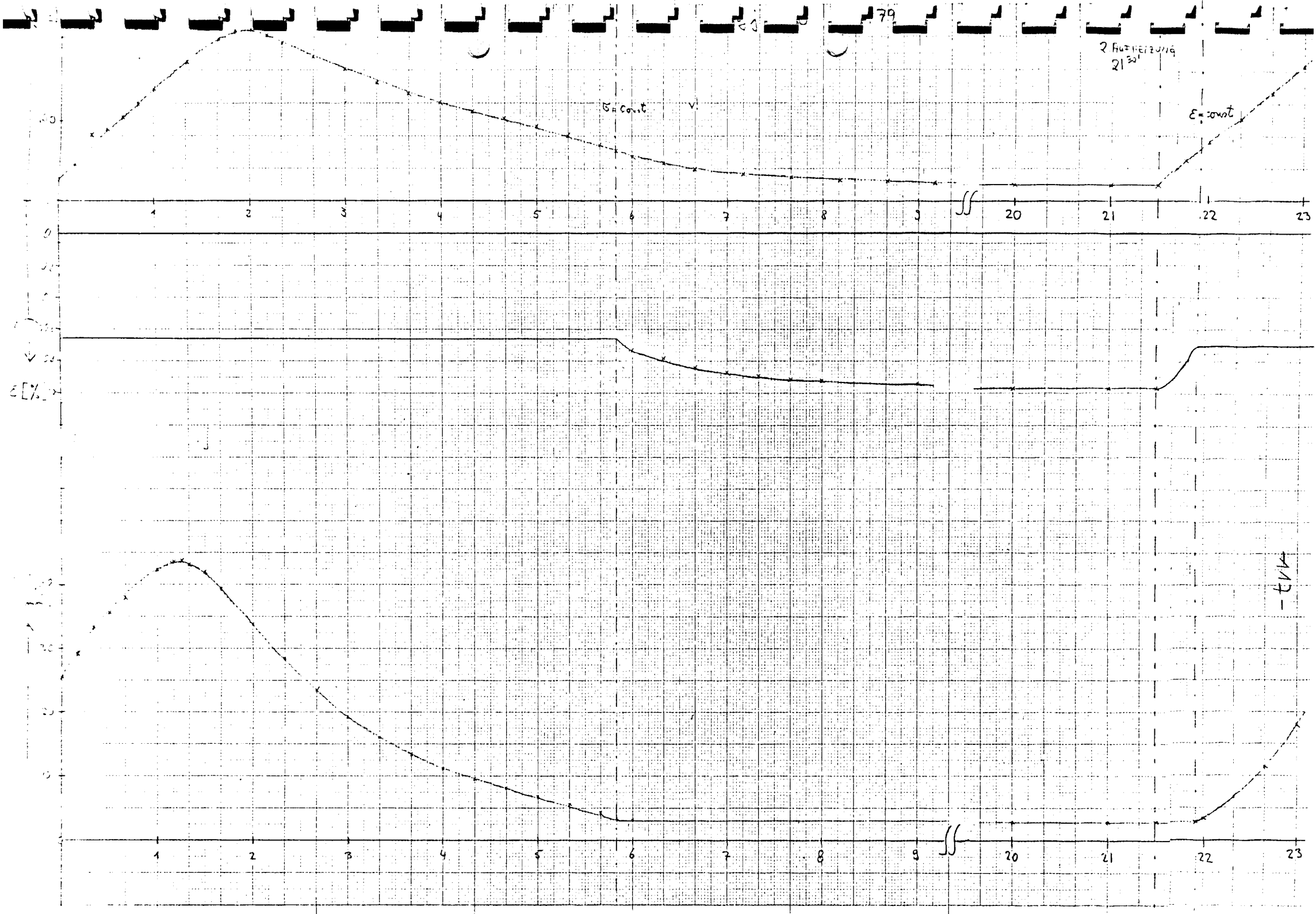
M3-







-146-



### III. Versuchsergebnisse von Probekörpern aus Lausanne

Im folgenden werden einige Versuchsergebnisse diskutiert, die an einem Kalksteinbeton aus Lausanne gewonnen wurden.

Für die Prüfungen wurden Zylinder 15/30 cm und Zylinder 8/30 angeliefert. Die in Plastikfolie eingewickelten Probekörper wurden nach dem Eintreffen im Institut ausgepackt und bis zur Untersuchung unter Wasser gelagert. Von den angelieferten Proben waren etliche durchgebrochen, so daß für die Untersuchungen nur zwei Probekörper zur Verfügung standen. Ein Probekörper (8/30 cm) diente zur Messung der thermischen Dehnung im Hochtemperaturprüfstand, und an dem anderen Probekörper (Zylinder 15/30 cm) wurden Festigkeit, E-Modul und Rohdichte nach 7-tägiger Dauertemperierung bei 250 °C im kalten Zustand gemessen. Aus einigen Bruchstücken der angelieferten Proben wurden weiterhin Proben zur Bestimmung der thermischen Dehnung im Hochtemperaturdilatometer ausgebohrt. Im einzelnen wurden folgende Untersuchungen durchgeführt:

#### a) Festigkeit, E-Modul, Rohdichte nach 7 Tagen Dauertemperierung bei 250 °C

Probekörper: 1 Zylinder 15/30 cm  
 Versuchsdurchführung: vgl. Abschnitt 6  
 Ergebnisse: Festigkeit -  $\beta_{c, Rest} = 35,3 \text{ N/mm}^2$   
 E-Modul -  $E_{Rest} = 19,2 \text{ N/mm}^2$   
 Rohdichte -  $\rho_{Rest} = 2,49 \text{ g/cm}^3$

#### b) Thermische Dehnung, gemessen mit Hochtemperaturprüfstand

Probekörper: 1 Zylinder 8/25 cm  
 Versuchsdurchführung: vgl. Abschnitt 13  
 Ergebnisse: Die Meßergebnisse sind auf dem nachfolgenden Bild 35 dargestellt. Im unteren Temperaturbereich bis 400 °C wurde ein  $\bar{\alpha}_T = 0,58 \cdot 10^{-5}/^\circ\text{C}$  gemessen. Damit liegt dieser Beton bezüglich der thermischen Dehnung bis 400 °C an der unteren Grenze aller untersuchten Betone. Im Absolutwert bei 800 °C liegt nur der Braunschweiger Beton B mit 6 % deutlich niedriger.

#### c) Thermische Dehnung, gemessen mit dem Hochtemperaturdilatometer

Probekörper: 4 Zylinder  $\varnothing 19 \text{ mm}$ ,  $l = 40 \text{ mm}$   
 Versuchsdurchführung: vgl. Abschnitt 13  
 Ergebnisse: Die Ergebnisse sind auf dem nachfolgenden Bild 36 dargestellt. Der mittlere lineare thermische Ausdehnungskoeffizient liegt im Bereich 20 °C bis 400 °C bei  $0,62 \cdot 10^{-5}/^\circ\text{C}$ , stimmt also recht gut mit dem aus Hochtemperaturprüfstand gemessenen Wert überein. Bei 800 °C wurde ebenfalls wie mit dem Hochtemperaturprüfstand eine thermische Dehnung von 10 % gemessen.

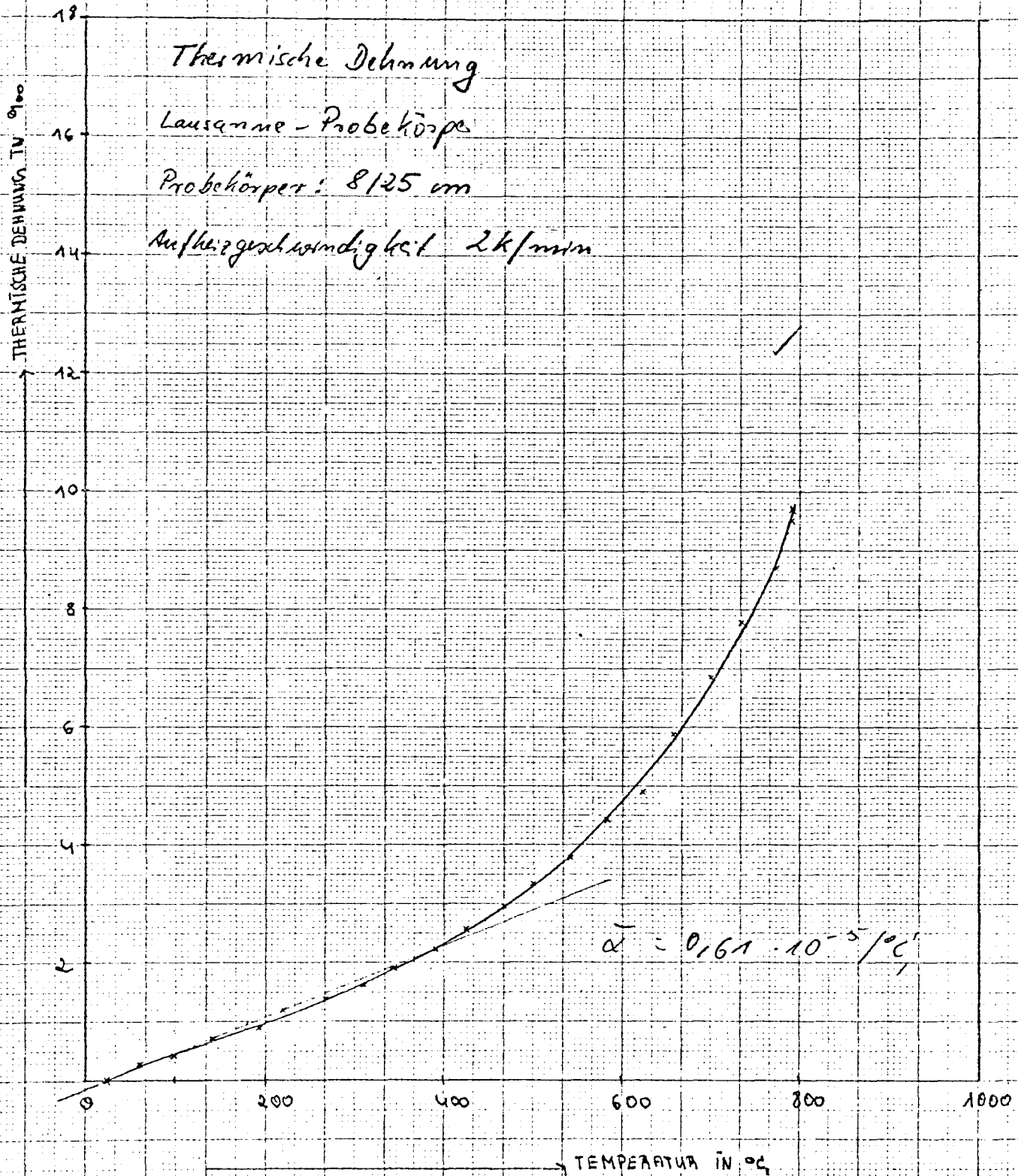


Bild 35: Thermische Dehnung des Lausanner Betons - gemessen im Hochtemperaturröhrstand



## LAUSANNE-Beton

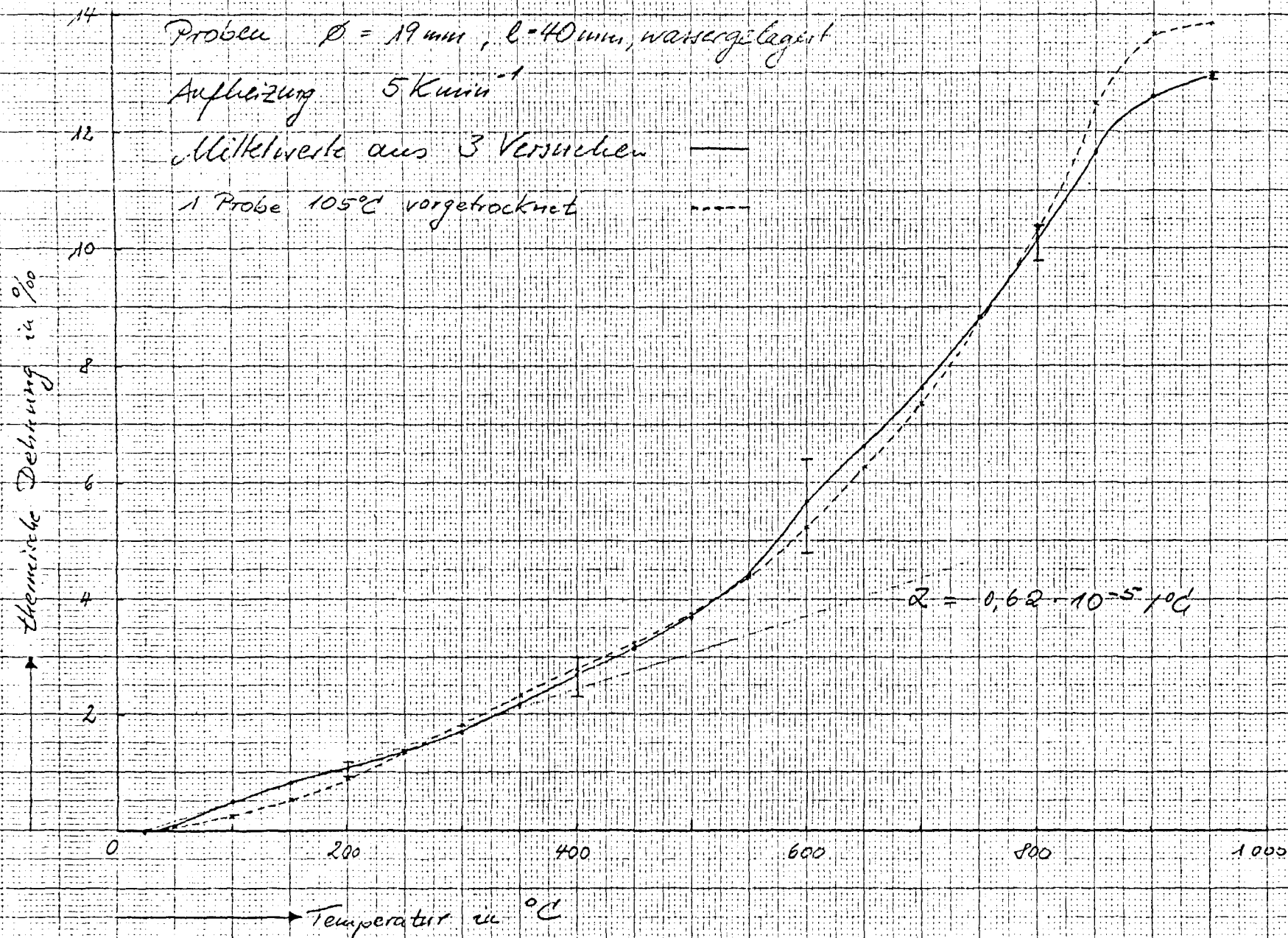


Bild 36: Thermische Dehnung des Lausanner Betons- gemessen im Hochtemperaturdilatometer

# Modifizierte Kalksteinbetone - Zwischenprogramm

Karlens

Betonzusammensetzung		1	2	3	4	5	6	7	8		KA - 1
Zement PZ 35 L NW/HS		240 kg	240 kg	240 kg	240 kg	240 kg	240 kg	380 kg	375 kg	HoZ 45 L	380 kg
Wassergehalt		144 l	144 l	173 l	173 l	144 l	144 l	141 l	150 l		141 l
Wasserzementwert:		0,60	0,60	0,72	0,72	0,60	0,60	0,37	0,40		0,37
Zusatzstoff: Flugasche Quarzmehl $W/(2 + FA/2)$		FA: 240 kg 0,40	QM: 240 kg -	FA: 360 kg 0,41	QM: 360 kg -	FA: 240 kg 0,40	QM: 240 kg -	FA: 46 kg 0,35	-		FA: 46 kg 0,35
Zuschlag: 0/4		-	-	-	-	-	-	-	Quarz		-
0/8		-	-	-	-	Quarz	Quarz	-	-		-
0/22,4		Kalkst.	Kalkst.	Kalkst.	Kalkst.	-	-	Quarz	-		Quarz
5/22,4		-	-	-	-	-	-	-	Kalkst.		-
8/22,4		-	-	-	-	Kalkst.	Kalkst.	-	-		-
Zusatzmittel: Fließmittel		3,5 % 8,4 l	3,5 % 8,4 l	2,0 % 4,8 l	4,0 % 9,6 l	- -	- -	1,0 % 3,8 l	- -		3,0 % 11,4 l
Mehlkorngehalt ca-Werte		510 kg	510 kg	630 kg	630 kg	510 kg	510 kg	460 kg	410 kg		460 kg
Konsistenz	Ausbreitmaß	32 cm	43 cm	30 cm	30 cm	47 cm	30 cm	30 cm	35 cm		36 cm
	Verdichtungsmaß	-	1,11	1,33	1,29	1,11	1,31	1,22	1,14		1,17
Druck- festigkeit in N/mm <sup>2</sup>	Würfel	7 d	22,0	16,0	25,5	19,0	18,7	16,6	40,7	37,1	56,5
		28 d	38,0	24,2	43,2	26,1	37,4	27,6	54,3	44,8	60,0
		90 d	46,4	26,6			43,8	30,3			81,3
	Zyl. 15/15	90 d	39,1	24,6			41,1	32,2			74,3
	Zyl. 15/30	90 d	42,9	19,6			38,6	31,7			67,7